



UNIVERSIDAD CATÓLICA
de Colombia

**EFFECTO DE LA ADICIÓN DE DIÓXIDO DE TITANIO EN LAS PROPIEDADES
MECÁNICAS Y DE DURABILIDAD EN MATERIALES A BASE DE CEMENTO**

PRESENTADO POR:

LEIDY SORANYI RANGEL VERDUGO 506483

JUAN DIEGO MOLINA VILLAR 506618

**UNIVERSIDAD CATOLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERIA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C.
2020**



UNIVERSIDAD CATÓLICA
de Colombia

**EFFECTO DE LA ADICIÓN DE DIÓXIDO DE TITANIO EN LAS PROPIEDADES
MECÁNICAS Y DE DURABILIDAD EN MATERIALES A BASE DE CEMENTO**

PRESENTADO POR:

LEIDY SORANYI RANGEL VERDUGO 506483

JUAN DIEGO MOLINA VILLAR 506618

DIRECTOR:

CAMILO HIGUERA FLÓREZ

UNIVERSIDAD CATOLICA DE COLOMBIA

FACULTAD DE INGENIERIA

PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL

BOGOTA D.C.

2020



UNIVERSIDAD CATÓLICA
de Colombia

FACULTAD DE INGENIERÍA
COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO

EFFECTO DE LA ADICIÓN DE DIÓXIDO DE TITANIO EN
LAS PROPIEDADES MECÁNICAS Y DE DURABILIDAD
EN MATERIALES A BASE DE CEMENTO

FECHA: 2020
VERSIÓN 0



Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

La presente obra está bajo una licencia:

Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

Para leer el texto completo de la licencia, visita:

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.5/co/>

Usted es libre de:



Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra

hacer obras derivadas


Bajo las condiciones siguientes:



Atribución — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).



No Comercial — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	EFFECTO DE LA ADICIÓN DE DIÓXIDO DE TITANIO EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS Y DE DURABILIDAD EN MATERIALES A BASE DE CEMENTO	FECHA: 2020 VERSIÓN 0
--	--	----------------------------------


NOTA DE ACEPTACIÓN:

FIRMA DEL PRESIDENTE DEL JURADO

FIRMA JURADO


FIRMA JURADO

BOGOTA D.C.

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	EFFECTO DE LA ADICIÓN DE DIÓXIDO DE TITANIO EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS Y DE DURABILIDAD EN MATERIALES A BASE DE CEMENTO	FECHA: 2020 VERSIÓN 0
---	---	--------------------------

DEDICATORIA

Dedicamos este trabajo investigativo a todo el campo de la Ingeniería Civil, lo cual lo cual nos inspira y motiva a dar toda nuestra disposición para proteger y mejorar la calidad de vida, por medio de la honestidad, aprendizaje e ingenio. También a nuestras familias que confiaron en nuestras capacidades y nos apoyaron desde que nació este sueño.

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	EFFECTO DE LA ADICIÓN DE DIÓXIDO DE TITANIO EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS Y DE DURABILIDAD EN MATERIALES A BASE DE CEMENTO	FECHA: 2020 VERSIÓN 0
---	---	--------------------------

AGRADECIMIENTOS

Expresamos nuestro agradecimiento a:

La Universidad Católica de Colombia por el aprendizaje brindado tanto profesional como personal en el transcurso de nuestra carrera.

Al Ingeniero Civil y Docente Héctor Camilo Higuera que nos acompañó, guio y asesoro en este trabajo investigativo.


Al Semillero de Investigación Nanoinnovatech de la Universidad Católica de Colombia y Docente Martin Espitia quién nos llevó a conocer sobre la innovación de materiales para la construcción.

A la Universidad Nacional de Colombia y Escuela de Ingenieros José Garavito por brindarnos sus instalaciones.

A nuestra familia que nos acompañó con ánimos de voluntad durante todo el proceso aprendido para la construcción de este logro.

CONTENIDO

RESUMEN.....	11
INTRODUCCIÓN	12
1. GENERALIDADES	13
1.1. ANTECEDENTES.....	13
1.2. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	16
1.3. OBJETIVOS.....	17
1.3.1. GENERAL	17
1.3.2. ESPECÍFICOS	17
1.4. JUSTIFICACIÓN.....	17
1.5. DELIMITACIÓN	19
1.5.1. Espacio.....	19
1.5.2. Tiempo.....	20
1.5.3. Contenido	20
1.5.4. Alcance.....	20
1.6. MARCO REFERENCIAL	20
1.6.1. MARCO TEÓRICO	20
1.6.2. MARCO CONCEPTUAL.....	41
1.6.3. ESTADO DEL ARTE	43
1.6.4. MARCO LEGAL.....	60
1.7. METODOLOGÍA	61
2. CARACTERIZACIÓN DE MATERIAS PRIMAS	63
2.1. AGREGADOS.....	63
2.2. CEMENTO	69
2.3. DIOXIDO DE TITANIO (TiO ₂)	74
3. DISEÑO DE MEZCLA	76
4. CARACTERIZACIÓN MUESTRAS DE MORTERO	79
4.1. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN.....	79

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	EFFECTO DE LA ADICIÓN DE DIÓXIDO DE TITANIO EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS Y DE DURABILIDAD EN MATERIALES A BASE DE CEMENTO	FECHA: 2020 VERSIÓN 0
--	--	----------------------------------

4.2.	PENETRACIÓN DE CLORUROS.....	85
4.3.	RESISTENCIA A LA POLARIZACIÓN LINEAL (RPL)	90
5.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	95
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	100
6.1.	CONCLUSIONES	100
6.2.	RECOMENDACIONES.....	100
7.	BIBLIOGRAFÍA.....	102
8.	ANEXOS.....	106

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Materia prima del cemento.....	21
Tabla 2. Compuestos principales del cemento.	22
Tabla 3. Tipos de cemento Portland.	23
Tabla 4. Clasificación de los agregados por tamaño.	28
Tabla 5. Tipos de exposición y peligros con el TiO_2	40
Tabla 6. Propiedades físicas del TiO_2	41
Tabla 7. Profundidades de carbonatación (mm) y coeficientes correspondientes a todas las mezclas.	56
Tabla 8. Tabla granulométrica, resultados ensayo NTC 77	63
Tabla 9. Límites superiores e inferiores curva granulométrica, según NTC 77	64
Tabla 10. Tabla abreviaturas peso inicial, peso seco en aire, peso SSS y peso saturado.....	65
Tabla 11. Tabla abreviaturas y valores de masa unitaria compacta, suelta y volumen.	68
Tabla 12. Valores obtenidos ensayo NTC 221.....	69
Tabla 13. Valores Densidad y Densidad relativa.	70
Tabla 14. Valores ensayo consistencia normal, NTC 110.	71
Tabla 15. Penetración (diferencial $L_f - L_i$) y relación a/c.	71
Tabla 16. Datos para interpolación lineal a los 10mm de penetración, según NTC 110.....	72
Tabla 17. Datos obtenidos de penetración cada tiempo determinado, durante 235min.	73
Tabla 18. Valores cálculo tiempo de fraguado.	74
Tabla 19. Valores obtenidos, caracterización TiO_2	75
Tabla 20. Clasificación tipos de mortero según su sistema de producción y composición.....	76
Tabla 21. Diseños de mezcla para cada muestra de mortero con su respectivo porcentaje de TiO_2 (0%, 1%, 2%, 3%).....	78
Tabla 22. Valores resistencia a la compresión para mortero con 0% TiO_2	80
Tabla 23. Valores desviación estándar en resistencia a la compresión para mortero con 0% TiO_2	80
Tabla 24. Valores resistencia a la compresión para mortero con 1% TiO_2	81
Tabla 25. Valores desviación estándar en resistencia a la compresión para mortero con 1% TiO_2	81
Tabla 26. Valores resistencia a la compresión para mortero con 2% TiO_2	82
Tabla 27. Valores desviación estándar en resistencia a la compresión para mortero con 2% TiO_2	82

Tabla 28. Valores resistencia a la compresión para mortero con 3% TiO_2	83
Tabla 29. Valores desviación estándar en resistencia a la compresión para mortero con 3% TiO_2	83
Tabla 30. Promedio de valores para resistencia a la compresión en cada muestra con porcentajes de TiO_2	83
Tabla 31. Valores obtenidos Dnssm (Coeficiente de migración en estado no estacionario) para mezcla de mortero con 0% TiO_2	87
Tabla 32. Valores obtenidos Dnssm (Coeficiente de migración en estado no estacionario) para mezcla de mortero con 1% TiO_2	87
Tabla 33. Valores obtenidos Dnssm (Coeficiente de migración en estado no estacionario) para mezcla de mortero con 2% TiO_2	88
Tabla 34. Valores obtenidos Dnssm (Coeficiente de migración en estado no estacionario) para mezcla de mortero con 3% TiO_2	88
Tabla 35. Promedio de valores obtenidos Dnssm (Coeficiente de migración en estado no estacionario) para mezcla de mortero con diferentes porcentajes de TiO_2	88
Tabla 36. Valores RPL para cada porcentaje de TiO_2	92
Tabla 37. Valores finales RPL, Icorr y Vcorr para cada porcentaje de TiO_2	94


LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Obtención de resistencia del cemento con la edad.	25
Figura 2. Relación de resistencia y relación agua/cemento.	32
Figura 3. Fase rutilo. Esfera gris representa el oxígeno	37
Figura 4. Fase Anatasa. Esfera gris representa el oxígeno.	37
Figura 5. Fase brookita. Esfera gris representa el oxígeno.	37
Figura 6. Fase Rutilo.	38
Figura 7. Fase Anatasa.	38
Figura 8. Fase Brookita.	38
Figura 9. Actividad fotocatalítica en el TiO_2	40
Figura 10. Resultados resistencia a flexión con adiciones de TiO_2 y una muestra convencional T0. a distintas dosificaciones de TiO_2 (0, 0.78, 2.32 y 3.88%).	45
Figura 11. Resultados resistencia a la compresión con adiciones de TiO_2 y una muestra convencional T0. a distintas dosificaciones de TiO_2 (0, 0.78, 2.32 y 3.88%)	45
Figura 12. Resistencia a la compresión con diferentes relaciones de w/s. A distintas dosificaciones de TiO_2 (0, 5, y 10%).	47
Figura 13. Resistencias a flexo-tracción en muestras con distintas dosificaciones de TiO_2 (1 Y 5%)	47
Figura 14. Resistencias a compresión en muestras con distintas dosificaciones de TiO_2 (1 Y 5%).	48
Figura 15. Resistencias a flexión en muestras con distintas dosificaciones de TiO_2 (0, 1, 3 Y 5%).	48
Figura 16. Resistencias a compresión en muestras con distintas dosificaciones de TiO_2 (0, 1, 3 Y 5%).	49
Figura 17. Resistencia a compresión a distintas dosificaciones de TiO_2 (0, 0.5, 0.75 y 1%).	50
Figura 18. Resistencia a compresión en función de su relación w/c. Con distintas dosificaciones de TiO_2 (0, 2.5 y 5%).	50
Figura 19. Difusión ion cloruro entre mezclas con distintas dosis de TiO_2 en mezclas. (1%, 2% y 3%), mezclas con cenizas volantes (30%) y muestra control.	52
Figura 20. Resistencia a la penetración de cloruros para muestras con distintas adiciones de TiO_2 , RHA conjuntas y muestra comparación.	53
Figura 21. Resistencia a penetración de cloruros a 14 y 28 días de curado para muestras con adiciones de TiO_2 y RHA (Ceniza de cascarilla de arroz).	53
Figura 22. Concentración ion cloruro para una muestra con 4.5% de TiO_2 a los 6 días de edad de curado en función propia y acoplada.	54

Figura 23. Resistencia a cloruros en muestras con 1.5% en masa de TiO_2 , ZrO_2 , Al_2O_3 , Fe_3O_4	55
Figura 24. Penetración de carbonatación para relaciones de w/c (a: 0.69 y b: 0.52), con distintos porcentajes de agua, a los 28 y 70 días de curado.....	55
Figura 25. Profundidad de carbonatación en lámina de concreto con adición de TiO_2 en comparación con profundidad de lámina sin presencia de TiO_2	56
Figura 26. Profundidad de penetración de carbonatación para todas las muestras con diferentes proporciones de TiO_2 (5%,10%,15% Y 20%).....	58
Figura 27. Resistividad eléctrica y clasificación de la velocidad de corrosión para muestras con distintas adiciones de TiO_2 , RHA conjuntas y muestra comparación.	59
Figura 28. Gráfico curva granulométrica.....	64
Figura 29. Gráfica lineal Penetración vs a/c.	72
Figura 30. Gráfica de la tendencia de resistencia a la compresión en mortero con porcentajes de TiO_2	84
Figura 31. Ensayo resistencia a compresión.	84
Figura 32. Gráfica ilustrativa proceso y fenómeno para la penetración de cloruros en materiales a base de cemento.	86
Figura 33. Gráfico ilustrativo de la tendencia entre el coeficiente de migración (D_{nss}) vs el contenido de TiO_2 en cada muestra.....	89
Figura 34. Ensayo de resistencia a cloruros.	89
Figura 35. Probeta ensayada a resistencia a cloruros.	90
Figura 36. Esquema RPL (resistencia a la polarización lineal).	90
Figura 37. Ensayo resistencia a la polarización lineal, ASTM G59 – 97.	91
Figura 38. Resultados obtenidos RPL por curvas de Tafel.	92
Figura 39. Gráfico comparativo para 7 y 28 días de curado entre muestra patrón (0%) y muestras con presencia de TiO_2	95
Figura 40. Resistencia a la penetración de cloruros.	96
Figura 41. Relación directamente proporcional entre I_{corr} y V_{corr} , con respecto a las muestras ensayadas.	97
Figura 42 . Relación inversamente proporcional entre RPL y V_{corr} , con respecto a las muestras ensayadas.	98
Figura 43. Clasificación valores I_{corr}	98

LISTA DE ANEXOS

Ilustración 1. Normas para el trabajo investigativo.....	106
Ilustración 2. Diseño de Mezcla con TiO_2	107
Ilustración 3. Tipos de Mortero.....	107
Ilustración 4. Granulometría del agregado.	108
Ilustración 5. Desviación Estándar Granulometría.	108
Ilustración 6. Masas Unitarias del Agregado.....	109
Ilustración 7. Contenido de Humedad del Agregado.....	109
Ilustración 8. Densidad del Agregado.	109
Ilustración 9. Densidad del Cemento.	110
Ilustración 10. Tiempos de Fraguado.....	110
Ilustración 11. Consistencia Normal.....	111
Ilustración 12. Densidad TiO_2	111

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	EFFECTO DE LA ADICIÓN DE DIÓXIDO DE TITANIO EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS Y DE DURABILIDAD EN MATERIALES A BASE DE CEMENTO	FECHA: 2020 VERSIÓN 0
--	---	--------------------------

RESUMEN


Actualmente el uso de dióxido de titanio (TiO_2) en las estructuras a base de cemento está en aumento, debido a sus propiedades fotocatalíticas que se activan al tener contacto con la radiación ultravioleta, lo cual genera en las estructuras a base de cemento la capacidad de autolimpiarse y depurar el aire, estos efectos son importantes para un desarrollo constructivo positivo, y aunque estos resultados han sido positivos respecto a la mejora del aspecto físico de las estructuras a base de cemento y una calidad de aire agradable en su entorno, es primordial considerar el efecto que puede llegar a producir el TiO_2 en factores como la resistencia donde proviene la capacidad de soportar fuerzas impuestas y por medio de ella inferir en otras propiedades, como lo son ataques físicos y químicos que pueden llegar a afectar drásticamente el comportamiento de la estructura.

Por tal razón en este trabajo investigativo se plantea el análisis del efecto que genera el uso de TiO_2 en materiales a base de cemento sobre la propiedad mecánica como la resistencia a la compresión del mortero y propiedades de durabilidad como la penetración de cloruros y velocidad de corrosión con diferentes porcentajes de TiO_2 .

En primer lugar, se evalúa la información actual de resultados de investigación relacionados con el funcionamiento del TiO_2 como material fotocatalítico en propiedades del cemento para así poder relacionar los resultados obtenidos.

Para la evaluación de la resistencia a la compresión por medio de la Norma NTC 220, se realiza por medio de cubos de mortero con una muestra patrón y diferentes dosificaciones de TiO_2 en la mezcla. Para la resistencia a la penetración de cloruros se realiza mediante la norma NT BUILD 492 donde se usa cilindros perforados. Y para la prueba de velocidad de corrosión se utilizó el método de resistencia a polarización lineal (RPL) el cual es el más utilizado para el cálculo de esta patología.

Con los resultados obtenidos de los ensayos realizados se establecen los análisis para determinar la influencia del TiO_2 sobre estas propiedades, a partir de ellos se concluye el trabajo investigativo y por último se establece una serie de recomendaciones para futuras líneas de investigación.

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	EFFECTO DE LA ADICIÓN DE DIÓXIDO DE TITANIO EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS Y DE DURABILIDAD EN MATERIALES A BASE DE CEMENTO	FECHA: 2020 VERSIÓN 0
--	---	--------------------------

INTRODUCCIÓN

En el campo de la ingeniería civil, suele ser, el estudio de mejoras e innovaciones de los materiales empleados en la construcción una disciplina empleada para afrontar las diferentes adversidades a las que se expone estos materiales.¹ Una rama importante que surge de la interacción continua entre el material aglomerante y el entorno fisicoquímico del ambiente es denominada como patología, por la cual, dependiendo de los factores mencionados se pueden presentar diferentes comportamientos no deseables en la matriz interna, afectando su comportamiento y/o servicio, por medio de las propiedades mecánicas y de durabilidad.²

En esta investigación se plantea un análisis y determinación del comportamiento que presenta el concreto, al emplear bajas dosificaciones de dióxido de titanio (TiO_2) a la mezcla y la influencia que este material presenta en el desarrollo normal de las propiedades básicas y óptimas de los materiales a base de cemento, además, por medio de este proceso, se plantea reconocer e identificar el efecto que ejerce el uso del dióxido de titanio en el cemento, por medio de sus propiedades fotocatalíticas.

¹ Kreiger, E. L., Kreiger, M. A. & Case, M. P. Development of the construction processes for reinforced additively constructed concrete. *Addit. Manuf.* **28**, 39–49 (2019).

² Lee, B. Y., Jayapalan, A. R. & Kurtis, K. E. Effects of nano-TiO₂ on properties of cement-based materials. *Mag. Concr. Res.* **65**, 1293–1302 (2013).

1. GENERALIDADES

1.1. ANTECEDENTES

A lo largo del tiempo el uso de materiales a base de cemento ha estado altamente relacionado con la historia de la humanidad, debido a la necesidad de resguardo, empleando rocas aglomeradas con arcilla.³

Durante la construcción de una carretera en Israel en el año 7000 a.C., se empleó por primera vez el concreto, con una mezcla de caliza calcinada, agua y piedra. Así mismo, con el pasar de los años se añadieron más componentes en las mezclas de cemento en busca de mejoras en las propiedades de las estructuras, debido a las solicitudes y avances tecnológicos en la sociedad. Gracias a las propiedades físicas, químicas y mecánicas, el cemento ha llegado a ser uno de los materiales más empleados en todo el mundo en el campo de la construcción.³

Al cemento es conocido como un material compuesto por materias primas básicas: calizas y arcillas, donde la caliza suministra calcio y las arcillas sílice y alúmina. Además de pequeñas proporciones de óxido de hierro, óxido de magnesio, álcalis y anhídrido sulfúrico. Donde Estos reaccionan con agua y agregados, desarrollando propiedades adhesivas y cohesivas, con la característica particular de formar materiales compactos, con resistencia y durabilidad. Además de la cal se han ido implementando otros materiales cementantes para diferentes usos como el asfalto y el yeso. La aglomeración de estos materiales con agua y agregados tienen la capacidad de reaccionar gracias a sus propiedades químicas, aunque, también puede reaccionar nocivamente con otros productos, afectando la durabilidad.³ Normalmente el cemento constituye entre el 7% y el 15% del volumen total del concreto. Es el componente más costoso por unidades de peso en el concreto. Por ello es importante caracterizar eficazmente los diseños de mezcla, sin afectar sus propiedades.³

Debido a razones técnicas, económicas y ambientales en el cemento se ha utilizado materiales suplementarios, los cuales también tienen propiedades cementantes, es decir, estos tienen la capacidad de reemplazar ciertas cantidades de cemento con el fin de mejorar la relaciones técnicas, económicas y ambientales. Las adiciones más empleadas son las puzolanas, escorias de alto horno, humo de sílice, cascarilla de arroz calcinada, ceniza volante, meta caolín, entre otros. De tal manera, esta

³ Ricardo, M. R. EL CONCRETO FUNDAMENTOS Y NUEVAS TECNOLOGÍAS. (2019).

investigación busca evaluar la posibilidad de implementar el dióxido de titanio como un nuevo material suplementario del cemento que cumpla con las solicitudes de la mezcla.³

El dióxido de titanio es una sustancia inorgánica de color blanco poco soluble, estable térmicamente y no inflamable, este se encuentra en abundante presencia en el entorno natural y con distintas estructuras cristalinas: anatasa, rutilo (tetragonal) y brookita (ortorómbica).⁴ Este compuesto cuenta con propiedades fotocatalíticas, donde se activa al contacto con la luz natural o artificial.⁵

En el entorno científico, dirigido hacia campos de investigación en la ingeniería civil, el dióxido de titanio ha recibido un amplio reconocimiento y aceptación, esto es, debido a sus características fotocatalizadoras y de purificación del aire.² El potencial de este material fue descubierto en 1972 por Fujishima y Honda, donde se reconocieron las propiedades fotocatalíticas y la degradación de determinados compuestos contaminantes característicos de los ambientes a los que están expuestos las infraestructuras.⁴ Siendo estos entornos grandes influyentes en su deterioro y fallos estructurales en tiempos prolongados.

Actualmente, en la comunidad científica existe un especial interés hacia las patologías que sufren las estructuras de concreto, debido a afectaciones en los materiales que las componen. Por ello el dióxido de titanio se ha convertido en un material influyente para la prevención y mitigación de enfermedades en las estructuras de concreto.

En el año 1996 se realizaron las primeras pruebas de actividad de autolimpieza en materiales a base de cemento con adiciones de dióxido de titanio, en el diseño de mezcla de la Iglesia Dives in Misericordia, Roma, Italia. Donde está conformada por tres grandes estructuras de 26 m, construidas con hormigón prefabricado, donde el

² Lee, B. Y., Jayapalan, A. R. & Kurtis, K. E. Effects of nano-TiO₂ on properties of cement-based materials. *Mag. Concr. Res.* **65**, 1293–1302 (2013).

³ Ricardo, M. R. EL CONCRETO FUNDAMENTOS Y NUEVAS TECNOLOGÍAS. (2019).

⁴ Abella, G. Mejora de las propiedades de materiales a base de cemento que contienen TiO₂: propiedades autolimpiantes. *Univ. Politécnica Madrid* 1–79 (2015).

⁵ Ander, A., Ugarteburu, E., Ignasi, T. & Hormaechea, C. OPTIMIZACIÓN DE LA APLICACIÓN DE NANOPARTÍCULAS FOTOCATALÍTICAS EN MORTEROS. 74 (2013).

cemento contenía 5% de dióxido de titanio. Con base en los ensayos mecánicos empleados en la mezcla de hormigón que se obtuvieron no se detectó efecto colateral en la resistencia a la compresión, tensión y flexión. Respecto a la durabilidad se detectó un aumento a la resistencia al congelamiento.⁶

Picada, un proyecto de investigación sobre recubrimientos innovadores con propiedades fotocatalíticas del programa Competitive and Sustainable Growth de Europa, implementado entre el 1 de enero de 2002 y finalización en el año 2005. Se efectuó con el fin de evaluar el comportamiento y efecto de las propiedades fotocatalíticas del dióxido de titanio que se introduce en una matriz de concreto o en revestimientos superficiales.⁶

En el año 2010 los ingenieros K. Behfarnia, A. Keivan del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Isfahan de Tecnología de Irán, realizaron un estudio sobre el efecto de las nanopartículas de dióxido de titanio en las propiedades físicas y mecánicas del concreto, y se concluyó que el dióxido de titanio disminuye la resistencia a la compresión final del concreto.⁷

Además de los beneficios que este compuesto puede brindar a los materiales a base de cemento empleados en la construcción, encontrando un uso favorable en cuanto al tema de sostenimiento y mejoras en la salud, puesto que, al presentar propiedades fotocatalíticas e hidrofílicas contribuye a desarrollar en la composición de este material, sistemas autolimpiantes y depuración del aire con la retención de sustancias nocivas presentes en el ambiente (CO_2 , NO_x y SO_2).⁸

Finalmente, para esta investigación se ha decidido emplear el dióxido de titanio como material a estudiar, por las razones anteriormente expuestas, ya que, gracias a su fácil obtención, accesibilidad económica y una amplia base de información en el uso de este material enfocado hacia la nanotecnología, autolimpieza y depuración del aire. Lo convierten en un material ideal de estudio en distintos campos no estudiados y evaluados a profundidad.

⁶ Mari siñeriz, m. aplicaciones arquitectónicas de los nanomateriales a base de titanio: envoltentes fotocatalíticas. (2015).

⁷ Prieto, F. B. Efecto del dióxido de titanio (TiO_2) en la resistencia a la compresión del concreto autolimpiante en Colombia. 96 (2015).

⁸ Khataee, A. R. & Kasiri, M. B. Photocatalytic degradation of organic dyes in the presence of nanostructured titanium dioxide: Influence of the chemical structure of dyes. J. Mol. Catal. A Chem. 328, 8–26 (2010).

1.2. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Actualmente con la llegada de nuevas tecnologías en los materiales de construcción, suelen ser los cementos fotocatalíticos una de las alternativas más empleadas dentro del campo de la construcción, exactamente con dióxido de titanio, como un compuesto catalizador que brinda efectos de autolimpieza y depuración del aire en la estructura al entrar en contacto con la radiación.⁹ Las investigaciones realizadas hasta el día de hoy se han enfocado particularmente en este importante descubrimiento. Aun así, no se ha determinado concretamente el efecto global que puede llegar a tener este compuesto en otros factores primordiales, haciendo referencia a las propiedades mecánicas y de durabilidad del concreto. Respecto a las exigencias estructurales, la resistencia mecánica es la característica más importante y fundamental del cemento.

La implementación de dióxido de titanio ha producido un amplio impacto sobre las propiedades del cemento. Según los estudios de investigación se ha determinado que el dióxido de titanio en dosis entre 5% y 10% de la masa de cemento ha generado efectos sobre el concreto en estado fresco, una disminución en la trabajabilidad de la mezcla.² Y en estado endurecido se ha obtenido una disminución en la resistencia a la carbonatación dado al aumento del coeficiente de hasta 24 mm/año.¹⁰ Esta relación es directamente dependiente de la dosificación de dióxido de titanio. De tal manera se ha concluido que existe una correlación entre la resistencia a la compresión y el coeficiente de carbonatación con respecto al contenido de dióxido de titanio adicionado en la mezcla.¹⁰


Respecto a la resistencia a la compresión se ha presenciado aumentos durante los primeros 15 días² y luego disminuciones hasta de un 35% en la resistencia a la compresión.⁷ Esto es debido a que el dióxido de titanio al ser usado a granel en la mezcla de cemento llega a actuar como una llenante obstruyendo los poros y así llagando a afectar dicha propiedad significativamente.²

² Lee, B. Y., Jayapalan, A. R. & Kurtis, K. E. Effects of nano-TiO₂ on properties of cement-based materials. *Mag. Concr. Res.* **65**, 1293–1302 (2013).

⁷ Prieto, F. B. Efecto del dióxido de titanio (TiO₂) en la resistencia a la compresión del concreto autolimpiante en Colombia. *96* (2015).

⁹ Lisbona, G. L. E. *Materiales Fotocatalíticos Y Sus Aplicaciones En Construcción*. 83 (2016).

¹⁰ Diamanti, M. V., Lollini, F., Pedferri, M. P. & Bertolini, L. Mutual interactions between carbonation and titanium dioxide photoactivity in concrete. *Build. Environ.* **62**, 174–181 (2013).

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	EFFECTO DE LA ADICIÓN DE DIÓXIDO DE TITANIO EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS Y DE DURABILIDAD EN MATERIALES A BASE DE CEMENTO	FECHA: 2020 VERSIÓN 0
--	--	----------------------------------

Dentro del comportamiento del dióxido de titanio en los materiales a base de cemento se ha establecido una baja precisión de los resultados respecto al efecto que tiene este compuesto sobre las propiedades mecánicas y de durabilidad.

De acuerdo con lo anterior, surge la pregunta problema de esta investigación: ¿Qué efecto puede producir la adición en dosis mínimas de TiO_2 en el comportamiento de las propiedades mecánicas y de durabilidad en materiales a base de cemento? Ámbito que como se trató anteriormente, no es muy frecuentado en base a la literatura consultada del uso de este material en materiales a base de cemento. En consecuencia, a esto, se desea por medio de este estudio, obtener resultados específicos que atestigüen concisos análisis y conclusiones con respecto al eje central de la pregunta problema.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. GENERAL

- Evaluar el comportamiento en las propiedades mecánicas y de durabilidad en muestras de mortero con bajas dosificaciones de dióxido de titanio.

1.3.2. ESPECÍFICOS

- Caracterizar materia prima y mezcla de cemento.
- Evaluar mediante ensayos de laboratorio las propiedades mecánicas en las muestras de mortero con diferentes adiciones de dióxido de titanio.
- Evaluar mediante ensayos de laboratorio la durabilidad en las muestras de mortero con diferentes adiciones de dióxido de titanio.
- Analizar el comportamiento que presenta las muestras de mortero con diferentes dosis de dióxido de titanio.

1.4. JUSTIFICACIÓN

El ejercicio de la construcción ha sido una de las más relevantes prácticas para el avance y desarrollo de la sociedad hasta los tiempos actuales, inmerso en esto se encuentra el campo de la ingeniería el cual está comprometido permanentemente

con el entendimiento y estudio de estas tecnologías fundamentales para la evolución³. El concreto como material de construcción ha sido el más utilizado debido a que sus propiedades y garantías económicas, son las que mejor se han adecuado a las exigencias que requieren estos procesos constructivos. Actualmente en el mundo se han presentado agresivos cambios ambientales, es por esto por lo que es necesario para el presente y futuro del sector desarrollar materiales con un desempeño óptimo en las propiedades, no solo mecánicas, sino también de durabilidad, que puedan dar garantía y estabilidad en las estructuras futuras dentro de ambientes agresivos y cambiantes.

Dentro de la práctica constructiva colombiana además del concreto, el mortero es un material fundamental para la construcción de estructuras, el cual, en un principio fue utilizado como relleno, pega y revoque¹¹. pero últimamente se está utilizando dentro de la mampostería estructural enfocado principalmente hacia la construcción de edificios y viviendas. En la práctica, el concreto y el mortero son ampliamente diferentes en aspectos como la consistencia, el modo de aplicación y los procesos de curado que se manejan para cada material, pero en términos de sus propiedades el concreto y el mortero son muy similares ya que están tienen una influencia importante en el desempeño de las necesidades que se desean satisfacer con el material, es por esto que es de suma importancia el trato que se realiza sobre el mortero.¹²

Como se mencionó anteriormente, en Colombia también se han presenciado cambios severos en las condiciones ambientales del entorno, además del agotamiento de recursos, factores por los cuales se afectan directamente las estructuras realizadas en estos materiales, ya sea en términos de funcionamiento y/o económicos, esto sumado a la necesidad y papel como actor fundamental que tiene el campo de la ingeniería civil dentro del crecimiento y desarrollo del país, generan la necesidad constante de estudiar nuevas e innovadoras alternativas que se ajusten a las competencias actuales de la construcción¹¹.

Por tal motivo, en esta investigación para nosotros, comprometidos con el campo de la ingeniería civil es necesario e importante complementar la información existente sobre la implementación de dióxido de titanio en materiales a base de

³Ricardo, M. R. EL CONCRETO FUNDAMENTOS Y NUEVAS TECNOLOGÍAS. (2019).

¹¹Gutierrez de Lopez, L. *EL CONCRETO Y OTROS MATERIALES PARA LA CONSTRUCCIÓN*. *Journal of Chemical Information and Modeling*, (2003)

¹² QUIROZ CRESPO, M. V. & SALAMANCA OSUNA, L. E. APOYO DIDÁCTICO PARA LA ENSEÑANZA Y APRENDIZAJE EN LA ASIGNATURA DE "TECNOLOGÍA DEL HORMIGÓN". 429 (2006).

cemento, a pesar de que existen a gran escala resultados sobre la depuración del aire y autolimpieza por la actividad fotocatalítica del material, existe una limitación con respecto a la investigación sobre el efecto que se genera en las propiedades mecánicas y de durabilidad del concreto con adiciones de dióxido de titanio.

Cabe resaltar que en la literatura indagada se realiza un enfoque hacia el uso del dióxido de titanio en nanopartículas, lo cual para poder llegar a caracterizar este compuesto es necesario realizar una serie de laboratorios determinados, como métodos para la formación de estas y microscopia electrónica de barrido (SEM). Por consiguiente, esta investigación está limitada al uso de este tipo de tecnología, por esto, se empleará el dióxido de titanio como polvo. Además de esto, se requiere llegar a modificar los porcentajes de dióxido de titanio ya establecidos en las investigaciones consultadas, debido a que estos han sido considerablemente altos de acuerdo con el diseño de mezcla, lo cual podría llegar a ser una variable importante en las investigaciones.

En esta investigación se requiere lograr un determinado alcance, lo cual es llegar a evaluar la interacción de muestras de mortero con distintos porcentajes de dióxido de titanio. Para esto se llevará a cabo ensayos en mezclas caracterizadas determinando el comportamiento en las propiedades mecánicas, específicamente el de la resistencia a la compresión y, por otra parte, ataque por cloruros y velocidad de corrosión en el análisis de durabilidad. Esto con el fin de clasificar y analizar los resultados a obtener. Y finalmente llegar a concluir si es apta la implementación de dióxido de titanio en materiales a base de cemento, puesto que a pesar de los grandes pasos en innovación que tiene este material en el campo, no se puede pasar por desapercibidos ámbitos cruciales en una estructura, como lo es su forma, capacidad servicio, y calidad.

1.5. DELIMITACIÓN

1.5.1. Espacio

- Espacios reducidos en los laboratorios para realizar los procedimientos de los ensayos.

1.5.2. Tiempo

- Poca disposición de tiempo para realizar una investigación más profunda y detallada del proyecto.
- Dificultad para acceder a los horarios establecidos en la realización de ensayos.
- Tiempo limitado para el desarrollo del trabajo debido a la pandemia que se presenta actualmente en el país.

1.5.3. Contenido

- Poca información teórica y experimental sobre lo tratado en el proyecto.
- Falta de acceso a equipos necesarios para realización de ensayos de penetración de cloruros y velocidad de corrosión en las muestras de mortero.

1.5.4. Alcance

- Muestras de mortero con diferentes dosificaciones de TiO_2 .
- Diagramas comparativos de los resultados con las diferentes dosificaciones de TiO_2 en las muestras de mortero.
- Reporte final sobre el análisis de los resultados obtenidos de la investigación y realización de ensayos en las muestras de mortero con diferentes dosis de TiO_2 .

1.6. MARCO REFERENCIAL

1.6.1. MARCO TEÓRICO

CEMENTO HIDRÁULICO

El cemento es conocido como un material con capacidad de desarrollar propiedades adhesivas y cohesivas, permitiendo unir los agregados para formar un material conocido como concreto. También se debe incluir otros materiales cementantes, como lo son: la cal, el asfalto y el yeso, entre otros. El más característico es el

cemento calcáreo, cuando entra en contacto con el agua por medio de reacciones químicas se desarrolla propiedades como lo son la resistencia y la durabilidad. Debido a su naturaleza, es un componente químicamente activo. El cemento constituye entre el 7% y el 15% del volumen total en el concreto y la cuantía es dependiente de las propiedades que adquiera la mezcla.³

La materia prima que conforman el cemento son las calizas que suministran calcio y arcillas que suministran sílice y alúmina. También con pequeñas adiciones de óxido de hierro, óxido de magnesio, álcalis y anhídrido sulfúrico. En la siguiente tabla se establece los límites de composición aproximados para el cemento Portland.³ En la siguiente tabla se evidencian los compuestos del cemento. (*Tabla 1*).

Tabla 1. Materia prima del cemento.

Compuesto	Como óxido	Límites aproximados (%)
Cal	CaO	60 a 67
Sílice	SiO ₂	17 a 25
Alúmina	Al ₂ O ₃	3 a 8
Óxido de hierro	Fe ₂ O ₃	0,5 a 6
Óxido de magnesio	MgO	0,5 a 4
Álcalis	Na ₂ O, K ₂ O	0,3 a 1,2
Anhídrido sulfúrico ^A	SO ₃	2 a 3,5

^A Trióxido de azufre

Fuente: Matallana, R., (2019).

Las calizas y arcillas son abundantes en la naturaleza, dependiendo de sus características y del tipo de cemento deseado estas se emplean para la dosificación ideal de cemento. Cuando las materias primas interaccionan entre ellas a altas temperaturas en un horno se forman nuevos compuestos químicos, más complejos (*Tabla 2*). Que permiten caracterizar finalmente el cemento.³

³ Ricardo, M. R. EL CONCRETO FUNDAMENTOS Y NUEVAS TECNOLOGÍAS. (2019).

Tabla 2. Compuestos principales del cemento.

Compuesto	Fórmula química	Abreviatura usada
Silicato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S
Silicato bicálcico	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
Ferroaluminato tetracálcico	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF

Fuente: Matallana, R., (2019).

El cemento tiene otros compuestos menores como lo son el óxido de magnesio (MgO), óxido de titanio (TiO_2), manganeso (MnO_2), ozono (O_3), y los álcalis de potasio y de sodio (K_2O y Na_2O). Estas cantidades son considerablemente pequeñas en el peso del cemento.³

➤ Materiales suplementarios o adiciones

Durante las últimas décadas se ha explorado el uso distintos tipos de cementos, donde se realizan adiciones con productos con propiedades cementantes, esto con el motivo de razones, técnicas, económicas y ambientales. Técnicamente con el fin de aprovechar sus propiedades estables que pueden llegar a complementar la función del cemento. Económicamente ya que son subproductos de procesos industriales, es decir, son reciclables. Y ambientalmente porque no requieren de un proceso industrial.³

Las adiciones más empleadas son las puzolanas lo cual son el resultado de mezclar ceniza volcánica, cal y agua. Las escorias de alto horno son un subproducto del tratamiento de minerales de hierro en el alto horno. El humo de sílice es un subproducto de la industria de las aleaciones del ferro sílice. Y la ceniza volante es proveniente de la combustión del carbón de las centrales generadoras de energía térmica. Estos materiales a pesar de que tengan propiedades cementantes no pueden actuar por sí solos.³

³ Ricardo, M. R. EL CONCRETO FUNDAMENTOS Y NUEVAS TECNOLOGÍAS. (2019).

➤ Tipos de cemento

Existen dos maneras de producción para diferentes tipos de cemento. La primera consiste en combinar las materias primas para que el Clinker resultante tenga una composición determinada. La segunda consiste en añadir al cemento adiciones para poder modificar determinadas propiedades.³

Los cementos hidráulicos son los que fraguan y endurecen en presencia de agua, mantienen su resistencia y son estables bajo el agua. De tal manera, tanto los cementos portland como los obtenidos en mezclas son “cementos hidráulicos” por ende así se llama a todos los cementos empleados en la construcción.³

➤ Cemento Portland

Este es un tipo de cemento hidráulico producido mediante la pulverización de Clinker y yeso, contienen hasta un 5% de caliza y adiciones. Con una composición química y caracterización física estable. Existen distintos tipos de cemento Portland según ASTM C150. (Tabla 3)

Tabla 3. Tipos de cemento Portland.

Tipo de cemento	Uso	Ejemplo de uso
I	Cuando no es requerida ninguna de las propiedades especiales de los otros cementos	Estructuras de concreto en general como vigas, columnas, losas y muros, entre otras, donde no son requeridas propiedades especiales de los demás cementos.
II	Cuando precisa moderada resistencia a los sulfatos o moderado calor de hidratación	Estructuras de drenaje, donde las concentraciones de sulfatos en aguas subterráneas son moderadas. Estructuras de masa considerable, como en muros de contención o cimentaciones masivas. Aguas freáticas o de infiltración, con moderadas concentraciones de sulfatos.
III	Cuando se requieren altas resistencias iniciales	En estructuras donde hay que desformaletar pronto, como estructuras industrializadas, o cuando la estructura debe ponerse al servicio rápidamente.
IV	Cuando es necesario bajo calor de hidratación	Para estructuras de concreto masivo, como grandes presas, donde existen altas diferencias de temperatura entre el interior y la parte externa de la estructura.
V	Cuando necesita alta resistencia a los sulfatos	Para estructuras en contacto con suelos o aguas con alto contenido de sulfatos.

Fuente: Matallana, R., (2019).

³ Ricardo, M. R. EL CONCRETO FUNDAMENTOS Y NUEVAS TECNOLOGÍAS. (2019).

PROPIEDADES DEL CEMENTO

El cemento posee determinadas propiedades físicas, químicas y mecánicas, que son transmitidas al concreto. Es importante comprenderlas detalladamente para comprender el funcionamiento, alcance y limitaciones del eso en estructuras de concreto.³

➤ Hidratación

Con la formación de los compuestos principales del cemento que llegan a constituir aproximadamente el 90% de la masa de cemento, el momento en que el cemento se mezcla con agua reaccionan químicamente desarrollando propiedades aglomerantes, es decir, los compuestos principales se hidratan y forman nuevos compuestos que con el tiempo constituyen la pasta de cemento endurecida.³

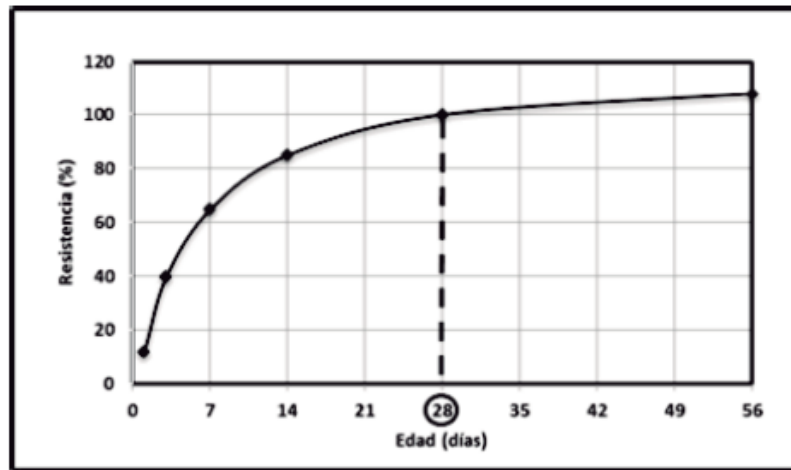
El proceso de hidratación se da desde la superficie del grano de cemento hacia su interior, hasta formar una película superficial que va ganando profundidad a medida que se desarrolla el proceso. La profundidad de hidratación del cemento en contacto permanente con agua es de aproximadamente 4 μm luego de 28 días y de 8 μm luego de un año, por tal motivo habrá una gran cantidad de granos, especialmente los más gruesas donde en su interior hay material sin reaccionar. Esta es la razón por qué hay granos que pueden durar varios años sin hidratarse o no hidratarse nunca. Para aprovechar totalmente el potencial de reacción del cemento con el agua es necesario seguir hidratando la mezcla, una vez haya fraguado, donde a eso se denomina curado, para que sea eficiente es importante que se aplique oportunamente y constantemente, por lo menos durante los primeros 7 días, que es el lapso de tiempo donde se desarrolla la mayor con mayor velocidad el proceso de hidratación.³

El proceso de hidratación está altamente relacionado con la ganancia de resistencia, donde comúnmente se obtiene en los 3 primeros días un 10% de resistencia, a los 7 días el 40% de resistencia, a los 14 días el 70% de resistencia y a los 28 días el 90% de resistencia. (FIGURA 1).³

³ Ricardo, M. R. EL CONCRETO FUNDAMENTOS Y NUEVAS TECNOLOGÍAS. (2019).



Figura 1. Obtención de resistencia del cemento con la edad.



Fuente: Matallana, R., (2019).

En la gráfica se puede ver la obtención de resistencia para los cementos Portland. Cuando se realiza alguna edición en la mezcla el comportamiento es diferente.

➤ Calor de hidratación

Por medio de la reacción química de los componentes del cemento en presencia de agua, se da la liberación de energía calórica. Durante el proceso de fraguado e inicio del endurecimiento se da la liberación de calor, donde cada uno de los compuestos del cemento individualmente aportan al calor de hidratación, es decir una cantidad específica, esto de acuerdo con su composición química. Por lo tanto, el calor de hidratación se conoce como la suma de calor generado por cada uno de los compuestos del cemento.³

Las unidades de expresión son en kilocalorías por kilogramo de cemento (kJ/Kg) o en kilocalorías por kilogramo de cemento (kcal/Kg). Comúnmente el desarrollo de calor de hidratación se da en la primera hora con 3.2 kJ/sKg, a las 10 horas con 2.5 kJ/sKg, a las 20 horas con 1.8 kJ/sKg, a las 30 horas con 1.5 kJ/sKg y a las 40 horas con 0.5 kJ/sKg. Como se puede ver, a medida que transcurre el tiempo el calor de hidratación del cemento disminuye, esto sucede en el proceso de fraguado y endurecimiento, presentándose un pico máximo de temperatura y terminando el proceso se da la disminución de la temperatura, para que así se dé la contracción

³ Ricardo, M. R. EL CONCRETO FUNDAMENTOS Y NUEVAS TECNOLOGÍAS. (2019).

de la mezcla de cemento y los esfuerzos de tensión internos que cuando supera los que puede soportar el concreto ocasionan su agrietamiento.³

El calor de hidratación en el cemento puede llegar a ser una propiedad negativa en el concreto, por eso es indispensable controlarlo. Un de las maneras es usar cementos con bajos contenidos de aluminato tricálcico (C_3A) y silicato tricálcico (C_3S), ya que son los compuestos que mayor calor de hidratación provocan. Otra solución son los cementos con adiciones, como las escorias de alto horno o metacaolín, que controlen esta condición. También controlar la temperatura en edades tempranas, manteniendo la estructura húmeda.³

➤ **Densidad**

La densidad del cemento es una propiedad física que relaciona la masa y el volumen que ocupa. Se expresa en unidades de masa por unidad de volumen (g/cm^3 , kg/m^3 , o t/m^3). La densidad del cemento Portland puede estar entre $3.100 kg/m^3$ y $3.150 kg/m^3$. El valor de densidad en el cemento no es un indicativo de su calidad, pero si da indicios de su cuantía o presencia de adiciones.³

➤ **Superficie específica o finura**

La finura del cemento es una propiedad física que se encarga de medir el tamaño de los granos de cemento en términos de área superficial. Es un concepto clave ya que influye en factores, como la velocidad de hidratación, la adquisición de resistencia, siendo directamente proporcional a la finura del cemento.³

Entre más fino sea el cemento, más rápido será el desarrollo de la reacción química durante el proceso de hidratación, permitiendo que este proceso sea mayor. Implícitamente se considera una mayor contracción y un mayor riesgo de fisuración en la masa de concreto, por eso el curado requiere una mayor atención.³

A medida que aumente la finura del grano de cemento, este es más reactivo. Esto se encuentra relacionado con el deterioro durante su almacenamiento, por su carácter higroscópico. En consecuencia, puede haber una alta probabilidad de que sea hidratado por la humedad del medio ambiente, por lo tanto, es importante evitar

³ Ricardo, M. R. EL CONCRETO FUNDAMENTOS Y NUEVAS TECNOLOGÍAS. (2019).

el deterioro temprano, cuidados especiales con el empaque, el sitio y tiempo de almacenamiento.³

El cemento con una alta finura en el concreto puede llegar a retener más agua de la mezcla, generando menor riesgo de exudación, pues su mayor finura retiene el agua y no permite que salga hacia a la superficie. Por lo tanto, la finura del cemento es una propiedad importante, que se debe considerar ya que de ella depende un óptimo desarrollo de las propiedades del concreto.³

➤ **Consistencia normal**

Es una característica física del cemento, se identifica sobre la pasta de cemento. Esta depende de la cantidad del agua. Es considerado un parámetro definido arbitrariamente usando las agujas de Vicat.³ La cantidad añadida de agua añadida a la mezcla de cemento le confiere una determinada fluidez, el contenido de agua de una pasta de cemento normal se expresa como porcentaje en peso del cemento seco y suele variar entre 23% y 33%, dependiendo de las características del cemento.

AGREGADOS

Es un material inerte, constituido por una combinación de agregados naturales o producidos al triturar rocas de mayor tamaño, estos son usados con la pasta de cemento para formar el concreto. Los agregados pueden ser de origen natural procedentes de rocas ígneas, metamórficas o sedimentarias como producto de la intemperie, la erosión y por el arrastre del agua o glaciares, que dan origen a partículas de piedra, gravas, áreas, limos y arcillas. Las arenas y gravas naturales, para el uso en mezclas de concreto, es posible obtenerlas directamente de los lechos o riveras en los ríos o en los depósitos aluviales, y emplearlos con su gradación natural. Para tener el tamaño requerido es necesario someter las grandes rocas a procesos de molienda y clasificación, este es conocido como canto rodado y arena de río que deben lavarse para eliminar las impurezas que pueda tener, tal como limo o materia orgánica. Los agregados de origen artificial son obtenidos a partir de procesos industriales, son empleados con propósitos particulares como en

³ Ricardo, M. R. EL CONCRETO FUNDAMENTOS Y NUEVAS TECNOLOGÍAS. (2019).

la elaboración de concretos livianos, donde es posible utilizar arcilla termo-expandida, ladrillo triturado, escorias de alto horno granuladas.³

En la clasificación de los agregados por tamaño, se denominan los agregados gruesos o grava y el agregado fino o gravilla. El agregado grueso se subdivide en piedra, grava o gravilla. El agregado fino se denomina en arena gruesa, media o fina. En la siguiente tabla de evidencia la clasificación de los agregados por tamaño.³

Tabla 4. Clasificación de los agregados por tamaño.

Tamaño (mm)	Mayor a 50	Entre 50 y 19,0	Entre 19,0 y 4,75	Entre 4,75 y 2,36	Entre 2,36 y 0,42	Entre 0,42 y 0,074	Entre 0,074 y 0,002	Menor a 0,002
Denominación	Piedra	Grava	Gravilla	Arena gruesa	Arena media	Arena fina	Limo	Arcilla
	Agregado grueso			Agregado fino			Fracción muy fina	
Recomendación	Material bueno para producir concreto			Material bueno para producir concreto			Material no recomendable	

Fuente: Matallana, R., 2019).

Los agregados también son clasificados por densidad, lo cual son liviano si la densidad es menor de 1.120 kg/m³ para agregado fino y menor de 880 kg/m³ para agregados gruesos, normal si la densidad esta entre 1.120 kg/m³ y 3.300 kg/m³ y pesado si la densidad es mayor de 3.300 kg/m³.

➤ Propiedades de los agregados

Granulometría

Está definida como la distribución en el tamaño de las partículas en una masa de agregados. Para la elaboración de un buen concreto este debe contener partículas de agregado de todos los tamaños, para que los espacios dejados por los más grandes sean ocupados por otros de menor tamaño y así sucesivamente. Lográndose minimizar los vacíos que serán llenados con la pasta de cementos, redundando en economía para la mezcla. Una masa de concreto con un mínimo de vacíos trae más beneficios, como una mayor compacidad reflejada en mayor resistencia, así mismo una menor permeabilidad incrementando la durabilidad. También se incrementa la superficie de adherencia, disminuyendo el riesgo de

³ Ricardo, M. R. EL CONCRETO FUNDAMENTOS Y NUEVAS TECNOLOGÍAS. (2019).

contracción. En estado fresco, se tiene mezclas cohesivas, que disminuyen el riesgo de segregación y exudación. Por lo tanto, según lo mencionado anteriormente la granulometría es la propiedad más importante de los agregados, sus variaciones pueden llegar a afectar la uniformidad entre la mezcla.³

AGUA DE MEZCLADO

El agua de mezclado conforma aproximadamente el 15% en volumen de concreto. Cumple dos funciones básicas, donde hidrata el cemento para que se desarrolle sus propiedades aglutinantes y proporciona fluidez a la mezcla en estado fresco. El agua de hidratación forma compuestos químicos y queda incorporada en el concreto y el agua que da manejabilidad a la mezcla se evapora, dejando tras de sí canales capilares dentro de la masa de concreto endurecido.³ La calidad del agua durante la mezcla es determinante en las propiedades de concreto. Todas las normas del mundo coinciden en que el agua apta para el consumo humano es la adecuada para la elaboración de mezclas de concreto, aunque algunas aguas de reciclaje también lo son, pero pueden ser usadas con algunas precauciones. El agua con sustancias disueltas o en suspensión tales como azúcar, ácidos, sales, materia orgánica, aceites, sulfatos, pueden llegar a alterar la hidratación del cemento. Afectando los tiempos de fraguado, reduciendo la resistencia y la durabilidad del concreto. Para ello es importante controlar la cantidad apta de estos agentes establecidos por la normatividad.³

PROPIEDADES DEL CONCRETO

El concreto es una roca artificial con dos estados definidos: fresco y el endurecido. El estado fresco es indispensable para el desarrollo de las propiedades en estado endurecido.³

El concreto en estado fresco es de consistencia plástica, que con el paso del tiempo se va perdiendo y así dando inicio al endurecimiento. La intersección de estos es el proceso de fraguado. Actualmente además de la resistencia es igual de importante asegurar la durabilidad a las distintas exposiciones que se puede tener, también la

³ Ricardo, M. R. EL CONCRETO FUNDAMENTOS Y NUEVAS TECNOLOGÍAS. (2019).

densidad, permeabilidad al agua, permeabilidad a cloruros, entre otros.³ De tal manera es importante para la tecnología del concreto conocer minuciosamente el comportamiento de las propiedades para el diseño de mezcla y desempeño de la estructura.³

CONCRETO FRESCO

Desde la ciencia de la reología que se encarga del estudio de la parte física del flujo de la mezcla, como lo es la viscosidad, la plasticidad, la elasticidad, entre otros. El estado fresco de la mezcla de concreto se refiere a la trabajabilidad o manejabilidad concretamente.³

➤ Trabajabilidad

También conocida como manejabilidad, este abarca la compactibilidad, la movilidad, la cohesividad, la consistencia y la plasticidad. Donde la compactibilidad explica la facilidad con la que el aire atrapado en la mezcla puede ser expulsado. La movilidad es la simplicidad con la que puede fluir la mezcla, ya sea en la formaleas y acero de refuerzo. La cohesividad es la resistencia a la segregación o exudación de la mezcla de concreto. La consistencia es el grado de humedad de la mezcla. Y la plasticidad es la propiedad que le permite a la mezcla ser adaptada y cambiar de forma, lentamente cuando es colocada en estado fresco.³

Para una óptima manejabilidad en la mezcla de concreto es importante controlar la cuantía de agua, la forma y textura superficial de los agregados, el contenido de aire incorporado, los tipos de aditivos empleados, las cantidades relativas de pasta y agregados y la relación arena/agregado total, entre otros.³

➤ Tiempos de fraguado

El proceso de fraguado ocurre desde el proceso de mezcla del cemento con agua, formando una pasta con plasticidad, esta se va perdiendo con el paso del tiempo, hasta que llega a endurecerse, el tiempo en que sucede este proceso se le conoce como tiempo de fraguado. En la práctica, el tiempo de fraguado tiene dos etapas,

³ Ricardo, M. R. EL CONCRETO FUNDAMENTOS Y NUEVAS TECNOLOGÍAS. (2019).

tiempo de fraguado inicial, ocurre durante el mezclado y la pérdida de plasticidad de la pasta y el tiempo de fraguado final es cuando la pasta deja de ser deformable.³

El proceso de fraguado va acompañado del calor de hidratación, durante el inicio hay un aumento rápido, mientras que al final se presenta el máximo valor. Por otra parte, el tiempo de fraguado depende de la temperatura ambiente, a medida que aumenta la temperatura se disminuye el tiempo de fraguado y viceversa. En temperaturas muy cercanas a 0 °C puede que el cemento no reaccione y no fragüe.

3

CONCRETO ENDURECIDO

Ya una vez endurecido el concreto, se desarrollan una serie de propiedades como lo son la resistencia, la durabilidad, estabilidad de volumen, resistencia al fuego, entre otras.³

➤ Resistencia

Estructuralmente es la característica más importante del cemento, es un requisito primordial para un óptimo servicio de la estructura. Esta propiedad se da principalmente durante el proceso de hidratación del cemento. Es conocida como la habilidad para resistir esfuerzos sin que falle. El concreto es muy resistente a los esfuerzos de compresión y por lo general esta propiedad es la que permite el diseño y el control de calidad de la estructura.³

La resistencia a la compresión se le conoce como al esfuerzo de falla del concreto, medido como el promedio de la resistencia de dos cilindros estándar (150 mm de diámetro) o tres cilindros de 100 mm de diámetro, es evaluada a una edad de 28 días o menos. La resistencia a los esfuerzos de tracción y corte son pequeños comparados con los de compresión.³

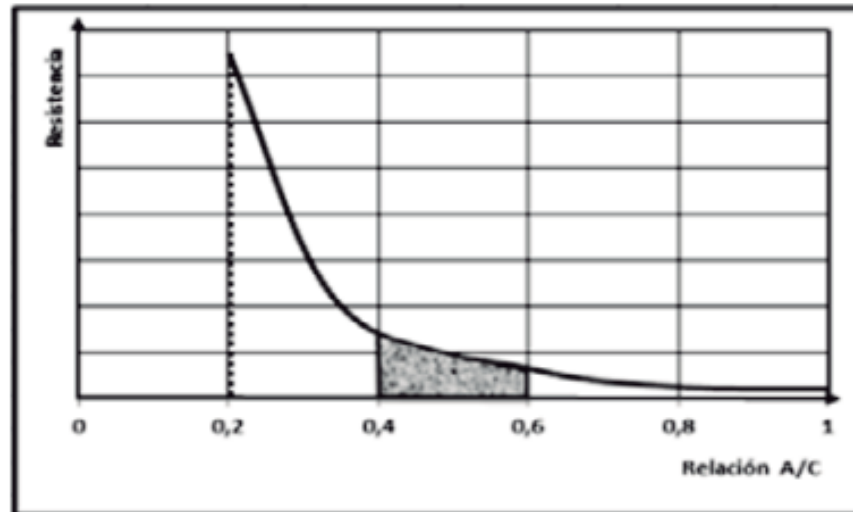
Existe una relación entre la resistencia y la relación agua cemento (a/c) de la mezcla de concreto. Se ha establecido esta relación de acuerdo con la edad y condiciones de curado del concreto. Es decir, a medida que haya más agua en la mezcla, mayor es la cantidad que no se combina con el cemento, por consiguiente, al disiparse la parte de agua evaporable, la pasta será más porosa, implicando menos resistencia,

³ Ricardo, M. R. EL CONCRETO FUNDAMENTOS Y NUEVAS TECNOLOGÍAS. (2019).



más permeable, menos densa y más durable. En la siguiente tabla se establece la relación de resistencia y contenido de agua/cemento.³

Figura 2. Relación de resistencia y relación agua/cemento.



Fuente: Matallana, R., 2019).

En la gráfica presentada se puede ver en la curva la caída de la resistencia de concreto a medida que la relación agua/cemento aumenta. La sección achurada de la gráfica representa los valores usados normalmente de relación agua/cemento, lo cual son entre 0.4 y 0.6.

Naturalmente la resistencia del concreto depende de la porosidad, la resistencia de la pasta endurecida, la resistencia propia de las partículas del agregado y la adherencia entre la pasta y los agregados.³

La porosidad está relacionada como la suma del volumen de todos los vacíos dentro del concreto, como, el aire atrapado, los poros capilares y los poros del gel. Por otra parte, ya que los agregados poseen una propia resistencia estos lo confieren al concreto, donde conjuntamente forman la pasta endurecida, por ello los agregados son vitales para la resistencia mecánica del concreto. La adherencia se da mediante el proceso de fraguado y endurecimiento de la pasta, donde se genera una trabazón física y mecánica, con la superficie de los agregados. Por ello es importante considerar la zona de contacto entre estos ya que garantiza resistencia al concreto.³

Los factores que influyen en la resistencia. Además de la relación a/c son: la granulometría, la textura superficial, la forma, la resistencia y el tamaño de los

³ Ricardo, M. R. EL CONCRETO FUNDAMENTOS Y NUEVAS TECNOLOGÍAS. (2019).

agregados, el tipo, calidad y cantidad del cemento, la calidad del agua, el tipo y cantidad de aditivos, la temperatura del medio ambiente, el proceso de fraguado y la edad del concreto.³

➤ Clasificación por resistencia

De acuerdo con la resistencia que se adquiere a los 28 días de edad, generalmente se realizan pruebas de compresión en probetas cilíndricas, donde se clasifica de la siguiente manera:

- ✓ Concreto de baja resistencia o concreto pobre:

La resistencia de este concreto es menor a 14 MPa (140 kgf/cm², 2.000 psi). El concreto estructural no puede ser menor de 17 Mpa (170 kgf/cm², 2.500 psi) según la NSR 10.³

- ✓ Concreto de resistencia normal:

Con una resistencia mayor o igual a los 14 MPa (140 kgf/cm², 2.000 psi) y menor a los 56 MPa (560 kgf/cm², 8.000 psi). Normalmente es considerada una resistencia normal hasta los 35 Mpa (35 kgf/cm², 5.000 psi) pero con el desarrollo de la tecnología una planta con adecuados controles puede producir concretos de resistencia de 56 Mpa de manera regular.³

- ✓ Concreto de alta resistencia:

Los concretos que adquieren una resistencia mayor de 56 Mpa (560 kgf/cm², 8.000 psi) son de alta resistencia. Y los concretos con resistencia superiores a 70 Mpa 700 kgf/cm², 10.000 psi) son conocidos como concretos de alto desempeño.³

³ Ricardo, M. R. EL CONCRETO FUNDAMENTOS Y NUEVAS TECNOLOGÍAS. (2019).

➤ Durabilidad

Según el comité la durabilidad del cemento Portland se conoce como la resistencia a la acción del medio ambiente, a los agentes químicos y biológicos, a la abrasión, u otro proceso de deterioro.¹³ Un concreto durable mantiene su estado original, calidad y propiedades de servicio al estar expuesto. La durabilidad está determinada por la calidad de los componentes en su dosificación y su interacción, así como los métodos de colocación, compactación y curado a los que sea sometido.³

En algunos casos la durabilidad prevalece más que la resistencia, por eso todos los diseños de mezcla consideran estas dos propiedades. Existen distintos factores que afectan la durabilidad del concreto.³

➤ Permeabilidad

Es uno de los factores principales, ya que hace posible el acceso de agentes agresivos, tanto para el concreto o el acero de refuerzo.¹³ La permeabilidad se relaciona con la vulnerabilidad a los ciclos hielo-deshielo, cuando el concreto se encuentra expuesto a las condiciones climáticas, pero también es el medio para que ingresen gases como dióxido de carbono, vapores o iones que desencadenan otras reacciones perjudiciales.³

➤ Corrosión

La alcalinidad del concreto se encarga de proteger el acero embebido de agentes del medio ambiente. Si la capa protectora se deteriora pueden entrar los agentes como dióxido de carbono, cloruros, oxígeno, agua, entre otros. Dando inicio a la corrosión.

Cuando el acero de refuerzo se oxida llega a aumentar su tamaño entre 2.2 y 4 veces su volumen original, ocasionando tensiones internas estimulando la aparición de grietas y descascaramientos de la capa de recubrimiento.³

³ Ricardo, M. R. EL CONCRETO FUNDAMENTOS Y NUEVAS TECNOLOGÍAS. (2019).

¹³ Diego, S. G. Tecnología del concreto y del mortero. (1993).

Los factores que inciden en la corrosión del acero de refuerzo pueden ser, por la pérdida de alcalinidad del concreto cuando este reacciona con sustancias ácidas del medio ambiente. Las reacciones que se pueden presentar para disminuir la alcalinidad puede ser la carbonatación por presencia de CO_2 , y/o lixiviación de los álcalis a causa de corrientes de agua. También la presencia de una cantidad suficiente de cloruros (añadidos durante la propia fabricación del concreto en el agua, los aditivos, los agregados, etc. O por penetración desde el microclima que rodea la superficie del concreto, además de otros iones despasivantes en contacto con el acero de refuerzo.

➤ **Penetración de cloruros**

El ion de cloruro es un elemento altamente corrosivo, está presente en aguas del mar, suelos o aguas freáticas, en plantas de tratamiento de aguas y piscinas. Para que se inicie un proceso de corrosión del acero embebido en un concreto con un pH de 12.5 se requieren entre 7.000 y 8.000 ppm (partes por millón) de cloruros. Pero si el pH es menor que 10 bastan tan solo cerca de 100 ppm, para iniciar el proceso de corrosión.³

El ataque de cloruros produce picaduras locales que rompen la capa pasivadora del acero de refuerzo, dando pie a un proceso anódico y reduciendo la sección de la barra. El riesgo de corrosión está en términos de la presencia de cloruro de sodio, se considera grave a partir de 0.4% con relación al peso del cemento o entre 0.05% y 0.1% del peso del concreto. Por lo anterior, se deben respetar los valores de concentración máxima del ion cloruro ya establecidos.³

Un factor importante a tener en cuenta para la penetración de cloruros es que los ciclos de humedecimiento y secado de agua con cloruros aumentan la concentración de estos en la capa superficial. Cuando ocurre el mojado de la superficie, el agua con cloruros penetra el concreto por succión capilar, cuando ocurre el secado, el agua se evapora y los cloruros permanecen en los poros del concreto.¹⁴

³ Ricardo, M. R. EL CONCRETO FUNDAMENTOS Y NUEVAS TECNOLOGÍAS. (2019).

¹⁴ Diego, S. G. Durabilidad y Patología del Concreto. (2002).

DIÓXIDO DE TITANIO (TiO₂)

Este compuesto es uno de los materiales más utilizados en todo el mundo, se caracteriza por ser uno de los minerales más blancos de la naturaleza. “El titanio es el noveno elemento más común de la corteza terrestre”.⁶ es una sustancia inorgánica, de color blanco donde tiene un diámetro entre 200 y 300 nm, comúnmente en polvo y minerales con procesos de cloruro o sulfato. Este un compuesto de fácil acceso y económico que no tiene graves repercusiones al ser empleado. Así mismo es muy utilizado en distintos tipos de industria, tal como lo son en pinturas, pegamentos, papel, caucho, plástico, textiles, cosméticos, productos farmacéuticos, agentes de tratamiento de agua, colorantes, cerámicas, entre otros. Este material cuenta con unas importantes propiedades que lo hacen demandante.⁴

El titanio (Ti) es un metal de transición, donde sus aleaciones reaccionan con distintos elementos como el oxígeno, carbono, hidrogeno y nitrógeno. El titanio es demasiado difícil de encontrar en estado puro, sino en óxidos, comúnmente en dióxido de titanio (TiO₂), este se extrae de una variedad de minerales naturales que contienen ilmenita, rutilo, anatasa y leucoxeno que se extraen de depósito en cualquier parte del mundo. El TiO₂ se puede encontrar en tres fases diferentes: rutilo (tetragonal), anatasa (tetragonal) y brookita (ortorómbica).⁸

En la Figura 1, 2 y 3 se puede ver la estructuración del dióxido de titanio en cada una de sus fases.¹⁵

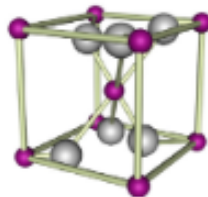
⁴ Abella, G. Mejora de las propiedades de materiales a base de cemento que contienen TiO₂: propiedades autolimpiantes. *Univ. Politécnica Madrid* 1–79 (2015).

⁶ Mari siñeriz, m. aplicaciones arquitectónicas de los nanomateriales a base de titanio: envolventes fotocatalíticas. (2015).

⁸ Khataee, A. R. & Kasiri, M. B. Photocatalytic degradation of organic dyes in the presence of nanostructured titanium dioxide: Influence of the chemical structure of dyes. *J. Mol. Catal. A Chem.* 328, 8–26 (2010).

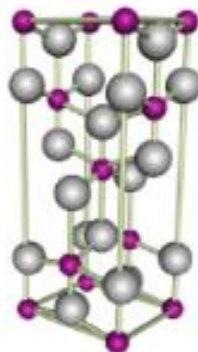
¹⁵ Khataee, A. & Ali, M. *Nanostructured Titanium Dioxide Materials*. (2012).

Figura 3. Fase rutilo. Esfera gris representa el oxígeno



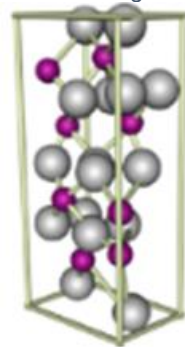
. Fuente: Alireza, H. & G Ali, 2012).

Figura 4. Fase Anatasa. Esfera gris representa el oxígeno.



Fuente: Alireza, H. & G Ali, 2012).

Figura 5. Fase brookita. Esfera gris representa el oxígeno.



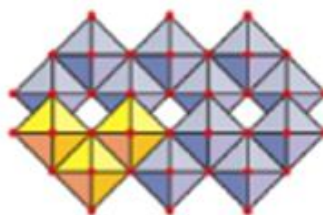
Fuente: Alireza, H. & G Ali, 2012).

En la Figura 4, 5 y 6 se puede ver las estructuras cristalinas del dióxido de titanio en cada una de sus fases. ⁸

⁸ Khataee, A. R. & Kasiri, M. B. Photocatalytic degradation of organic dyes in the presence of nanostructured titanium dioxide: Influence of the chemical structure of dyes. J. Mol. Catal. A Chem. 328, 8–26 (2010).

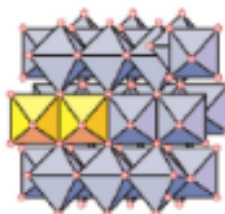


Figura 6. Fase Rutilo.



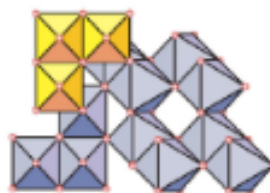
Fuente: Khataee, A. R. & Kasiri, (2010).

Figura 7. Fase Anatasa.



Fuente: Khataee, A. R. & Kasiri, (2010).

Figura 8. Fase Brookita.



Fuente: Khataee, A. R. & Kasiri, (2010).

La gran utilidad de este compuesto se debe a las fases en las que se cristaliza el TiO_2 donde la fase Rutilo y Anatasa son estables termodinámicamente. La fase Anatasa y Brookita se transforman en el Rutilo estable con temperaturas de 400 °C a 5 °C.⁸

⁸ Khataee, A. R. & Kasiri, M. B. Photocatalytic degradation of organic dyes in the presence of nanostructured titanium dioxide: Influence of the chemical structure of dyes. J. Mol. Catal. A Chem. 328, 8–26 (2010).

➤ Propiedades del TiO_2

Una de las propiedades principales del TiO_2 es su actividad fotocatalítica, cuando este entra en contacto con la luz solar, el material catalizador se activa mediante la radiación ultravioleta (UV) y seguidamente se da el proceso de oxidación-reducción donde hay una transformación de sustancias orgánicas e inorgánicas en compuestos inofensivos.⁴ La catálisis cumple un papel importante, por medio de un proceso químico se altera la velocidad de la reacción con la presencia del agente catalizador.⁷

Exactamente el proceso que se da en la actividad fotocatalítica es la degradación de compuestos dañinos para el medio ambiente. Donde los más comunes son el dióxido de carbono CO_2 , óxidos de nitrógeno (NO_x) y los óxidos de azufre (SO_x).⁷

Para que se dé el proceso de fotocatálisis se debe tener presente los siguientes componentes:

- “Un fotón emitido de cierta longitud de onda específica”.⁴
- “Una superficie catalítica, usualmente un material semiconductor”.⁴
- “Un agente fuertemente oxidante, generalmente es oxígeno”.⁴

El TiO_2 tiene una estructura electrónica de dos bandas, una de valencia que está llena de electrones y la otra de conducción que esta sin electrones.⁴ La diferencia energética entre las dos bandas es llamada la banda de prohibida, de tal forma, cuando un fotón con una energía superior, entra en contacto directo con la foto actividad del material, un electrón de la banda de valencia pasa hacia la banda de conducción, dejando un hueco electrónico. Una parte del par foto excitado hueco-electrón se difunde a la superficie del material, donde es retenido y así iniciar las reacciones químicas con moléculas de oxígeno y agua presentes en el medio ambiente.⁷

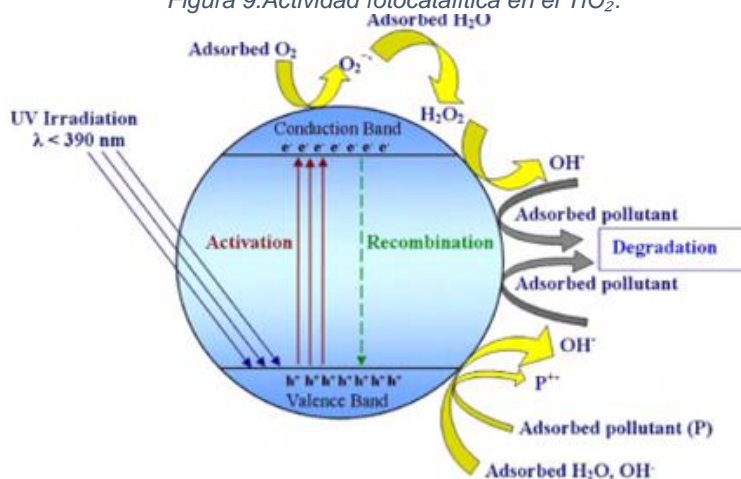
⁴ Abella, G. Mejora de las propiedades de materiales a base de cemento que contienen TiO_2 : propiedades autolimpiantes. *Univ. Politécnica Madrid* 1–79 (2015).

⁷ Prieto, F. B. Efecto del dióxido de titanio (TiO_2) en la resistencia a la compresión del concreto autolimpiante en Colombia. 96 (2015).



En la superficie del TiO_2 donde son producidos radicales hidroxilos (oxidantes) y aniones radicales superoxidantes (reductores), son los encargados de degradar los distintos tipos de microorganismos, ya sea orgánicos e inorgánicos.¹²

Figura 9. Actividad fotocatalítica en el TiO_2 .



Fuente: Khataee, A. R. & Kasiri, (2010).

➤ Exposición al TiO_2

Tabla 5. Tipos de exposición y peligros con el TiO_2 .

Tipo de exposición	Peligros	Prevención	Primeros auxilios
Incendio	No combustible		En caso de incendio en el entorno, están permitidos todos los extintores
Inhalación		Extracción localizada o protección respiratoria	Aire limpio y reposo
Piel			Aclarar y lavar la piel con agua y jabón
Ojos	Enrojecimiento	Gafas de seguridad	Enjuagar con abundante agua durante varios minutos y proporcionar asistencia medica
Ingestión		No comer, ni beber ni fumar durante el trabajo	Enjuagar la boca

Fuente: Prieto, F. B. (2015).

¹² QUIROZ CRESPTO, M. V. & SALAMANCA OSUNA, L. E. Apoyo didáctico para la enseñanza y aprendizaje en la asignatura de 'tecnología del hormigón'. 429 (2006).

Tabla 6. Propiedades físicas del TiO_2 .

Datos importantes	Propiedades físicas
Estado físico: Polvo cristalino entre incoloro y blanco	Punto de ebullición: 2500-3000 °C
Límites de exposición: Cancerígeno, categoría 3 ^a	Punto de fusión: 1855 °C
Vías de exposición: La sustancia se puede absorber por la inhalación del aerosol.	Densidad relativa: 3,9-4,3 g/cm ³
Riesgo de inhalación: Se puede alcanzar rápidamente una concentración molesta de partículas en el aire cuando se dispersa	Solubilidad en agua: Ninguna
Efectos de exposición de corta duración	

Fuente: Prieto, F. B. (2015).


1.6.2. MARCO CONCEPTUAL

Este apartado se fundamenta de la literatura consultada y las fuentes fundamentales consideradas en el estado del arte, por ende, se busca realizar una comparación de las metodologías empleadas, sus resultados y el enfoque principal de cada uno de estos estudios. Para así, estructurar un documento preciso con respecto al análisis teórico de nuestras fuentes de investigación. En la literatura consultada se coincide, primeramente, en ser el TiO_2 el motivo principal de investigación, aunque no en todas las fuentes se presentara el mismo empleo de este material, ni tampoco se planteara con las mismas finalidades. Aun así, por medio de esta diversidad de usos se da la presencia de resultados y análisis comparativos, dándonos una idea más global del empleo que este material presenta en el campo de los materiales y la construcción.

El titanio es una sustancia abundante en la corteza terrestre, pero es poco habitual encontrarla en su forma natural, esta, al tener una interacción con el ion Oxígeno genera un compuesto conocido como dióxido de titanio (TiO_2)⁴. En el transcurso de la revisión se observó que la propiedad más estudiada y llamativa del TiO_2 es efectivamente su comportamiento como fotocatalizador, ya que, debido a esta cualidad, el TiO_2 realiza un proceso de catálisis activado por radiación, donde se pueden degradar compuestos orgánicos nocivos como el CO_2 , NO_x , SO_x , entre otros.¹⁶ Esta propiedad en este material está siendo estudiada principalmente para

⁴ Abella, G. Mejora de las propiedades de materiales a base de cemento que contienen TiO_2 : propiedades autolimpiantes. *Univ. Politécnica Madrid* 1–79 (2015).

¹⁶ Cárdenas Ramírez, C. EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y FOTOCATALÍTICAS DE CEMENTO

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	EFFECTO DE LA ADICIÓN DE DIÓXIDO DE TITANIO EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS Y DE DURABILIDAD EN MATERIALES A BASE DE CEMENTO	FECHA: 2020 VERSIÓN 0
--	---	--------------------------

temas de autolimpieza y depuración del aire. Aunque esto no significa que sean los únicos campos de estudio para este material, ya que, según diversos estudios, este material produce mejoras en las propiedades mecánicas del concreto. Esta afirmación puede ser un poco controvertida, debido a la diversa información presentada en las fuentes consultadas. Por ejemplo, algunos documentos afirman que la adición de TiO_2 en distintas presentaciones produce ligeras reducciones en las propiedades mecánicas del material. Principalmente, en la resistencia a compresión en comparación con mezclas convencionales. En cambio, otros estudios afirman todo lo contrario, con resultados hasta de un 22% en aumento de la resistencia a la compresión¹⁷. Esta incongruencia en los ensayos puede presentarse también, debido al método de integración del dióxido de titanio en las mezclas de mortero, donde dicho compuesto suele ser tratado comúnmente a escalas manométricas y se puede caracterizar de distintas maneras; a granel como nanopartículas, nanopolvos, nanocristales y entre otros. Factores que pueden llegar a alterar el comportamiento de la mezcla y sus propiedades mecánicas.

Por otra parte, La durabilidad es una propiedad fundamental en las mezclas a base de cemento, además de la continua exposición que sufren estos aglomerados con los agentes contaminantes presentes en el medio ambiente, los cuales suelen ser una razón principal por la cual se presentan fallas internas y externas en las matrices de los MBC, tanto en ámbitos estéticos como estructurales. Es por esto que también se ha tomado la decisión de analizar propiedades de durabilidad puntuales más presentadas en el entorno. Los procesos de purificación se han convertido en una alternativa muy llamativa para la comunidad científica, ya sea por medio de procesos foto-inducidos, incrustación de TiO_2 u otras cinéticas empleadas para estos fines¹⁰. en la literatura consultada los resultados con respecto a este tema suelen ser más limitados, pero también se observan incongruencias en los resultados ya que se utilizan distintas metodologías para la evaluación de estos fenómenos, ya que mientras en ciertas investigaciones se utilizan altos porcentajes de adición de TiO_2 .^{10 18 19} El ensayo realizado por S. Rao²⁰ mostro resultados

¹⁰ Diamanti, M. V., Lollini, F., Pedferri, M. P. & Bertolini, L. Mutual interactions between carbonation and titanium dioxide photoactivity in concrete. *Build. Environ.* **62**, 174–181 (2013).

¹⁷ Jalal, M., Fathi, M. & Farzad, M. Effects of fly ash and TiO_2 nanoparticles on rheological, mechanical, microstructural and thermal properties of high strength self compacting concrete. *Mech. Mater.* **61**, 11–27 (2013).

alentadores con respecto a esta propiedad, la diferencia presentada con respecto a las otras investigaciones fue el porcentaje en masa utilizado el cual fue de un 0.5%, siendo este un indicador de patrón a seguir en el cual, el uso de pequeñas dosis pueda ser fundamental para ver una mejor reacción o comportamiento en el material cementante.

Personalmente con nuestro grupo de trabajo al realizar una aglomeración y continua comparación de resultados de la literatura consultada, pudimos detallar que es un terreno muy amplio por albergar, el empleo y uso que se le da a este material en el campo de la construcción y los materiales. Enfatizados así, en continuar con el proceso investigativo y metódico del comportamiento que presenta la interacción entre estos dos materiales hacia las propiedades mecánicas y de durabilidad, inclinados en proponer nuevos diseños de mezcla con los cuales se puedan realizar análisis comparativos partiendo desde lo teórico a lo experimental.

1.6.3. ESTADO DEL ARTE

Los materiales a base de cemento suelen ser expuestos continua y directamente a ambientes nocivos con presencia de contaminantes atmosféricos y microorganismos, además de los frecuentes cambios en las condiciones ambientales a las que están sometidos. Estas condiciones suelen producir cambios importantes en las propiedades de los materiales, concretamente hacia ámbitos como la estética, durabilidad y estabilidad, perjudicados por la afectación que impactan a las propiedades mecánicas y de durabilidad las cuales son fundamentales para el óptimo funcionamiento de un material a base de cemento. Por ejemplo, las resistencias a compresión, flexión, carbonatación, cloruros y las velocidades de corrosión son propiedades continuamente afectadas por el envejecimiento y la constante exposición que sufre una estructura.

El uso de adiciones dentro de las mezclas de concreto son prácticas comunes empleadas por razones técnicas, económicas y ambientales. En el ámbito técnico se busca convertir dicha adición en un producto cementante estable, insolubles en

¹⁸ Hasebe, M. & Edahiro, H. Experimental studies on basic properties of concrete using TiO₂ as admixture. *Proc. 13th East Asia-Pacific Conf. Struct. Eng. Constr. EASEC 2013* (2013)

¹⁹ Bogutyn, S., Arboleda, C., Bordelon, A. & Tikalsky, P. Rejuvenation techniques for mortar containing photocatalytic TiO₂ material. *Constr. Build. Mater.* **96**, 96–101 (2015).

²⁰ Rao, S., Silva, P. & De Brito, J. Experimental study of the mechanical properties and durability of self-compacting mortars with nano materials (SiO₂ and TiO₂). *Constr. Build. Mater.* **96**, 508–517 (2015).

agua y resistentes a exposiciones agresivas. Económicamente se busca reducir costos, ya que su fabricación y molienda es mucho más económica que la del Clinker. Además, ambientalmente también se genera un impacto positivo puesto que en la mayoría de los casos las adiciones empleadas son desechables y no necesitan de procesos industriales previos. Existen investigaciones en las que se ha implementado el uso de dióxido de titanio como una adición a la mezcla de concreto con el fin de evaluar los resultados que este produce y si es viable implementarlo para funciones estructurales.

Actualmente el uso de dióxido de titanio se emplea comúnmente en la fabricación de cosméticos, productos de salud, pinturas y alimentos, aportando un mejor aspecto estético a estos productos.²¹ Aunque el uso de este compuesto ha sido empleado desde 1996 en el campo de la construcción cuando se realizaron los ensayos de mezcla de la iglesia Dives In Misericordia (R6) hoy en día no ha sido posible establecer globalmente un uso persistente de este material en el campo de la ingeniería civil, esto, posiblemente por la baja e inconsistente información obtenida enfocada a análisis más veraces y profundos del dióxido de titanio sobre la mezcla de concreto aparte de sus funciones auto-limpiantes. Siendo así mismo las propiedades mecánicas y de durabilidad vitales para el correcto funcionamiento de cualquier estructura.

1.6.3.1 PROPIEDADES MECÁNICAS

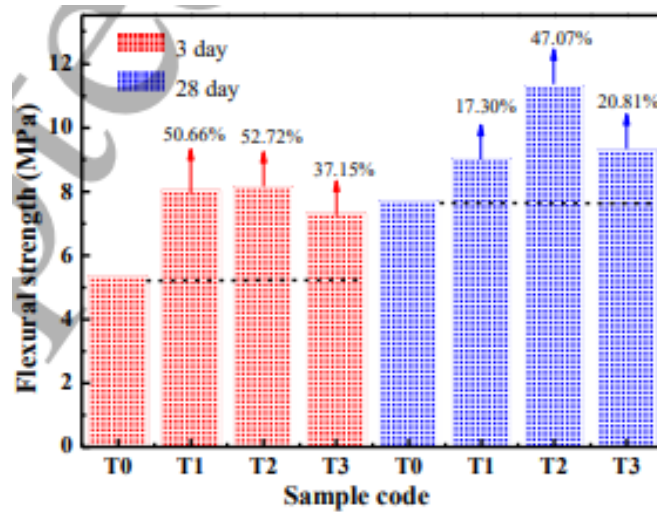
El estudio de este compuesto TiO_2 sobre propiedades mecánicas de los materiales a base de cemento ha sido limitado por parte de las entidades científicas, ya que, como se mencionó anteriormente la función primordial de este se basa en sus funciones inteligentes (Auto-limpieza y depuración del aire), aun así, hay constancia de algunos científicos importantes que han realizado estudios sobre estos criterios como Li Zhen,²² quien realizó un estudio en el año 2017 sobre estas temáticas, mencionando que la adición de TiO_2 en concreto en polvo reactivo produce un aumento en las propiedades mecánicas a todas las edades en comparación con una mezcla convencional (*Figura10*). En este también se hace mención a la

²¹ JULIANA, G. T. El dióxido de titanio como material fotocatalítico y su influencia en la resistencia a la compresión en morteros. **63**, 63 (2015).

²² IOPSCIENCE. Effect of nano-titanium dioxide on mechanical and electrical properties and microstructure of reactive powder concrete. 2–24 (2018).

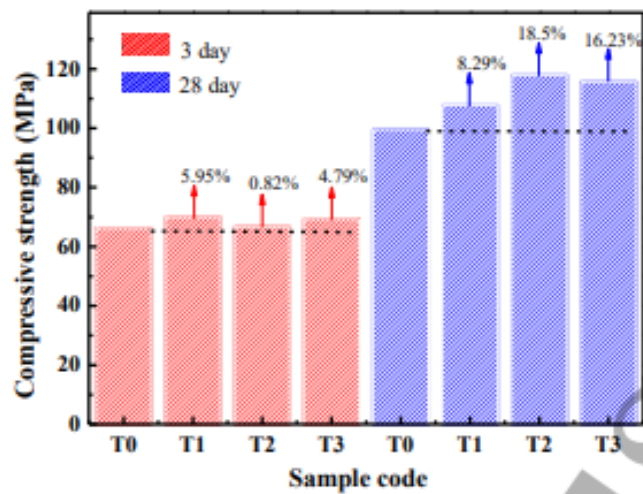
ausencia que se presenta sobre estos materiales en la totalidad de su funcionalidad ya que, como menciona “el TiO_2 no solo dota a los materiales a base de cemento con rendimientos fotocatalíticos, también ofrece mejoras en sus propiedades mecánicas y propiedades eléctricas”.

Figura 10. Resultados resistencia a flexión con adiciones de TiO_2 y una muestra convencional T0. a distintas dosificaciones de TiO_2 (0, 0.78, 2.32 y 3.88%).




Fuente: Zhen. L. (2017).

Figura 11. Resultados resistencia a la compresión con adiciones de TiO_2 y una muestra convencional T0. a distintas dosificaciones de TiO_2 (0, 0.78, 2.32 y 3.88%)



Fuente: Zhen. L. (2017).

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	EFFECTO DE LA ADICIÓN DE DIÓXIDO DE TITANIO EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS Y DE DURABILIDAD EN MATERIALES A BASE DE CEMENTO	FECHA: 2020 VERSIÓN 0
--	---	--------------------------

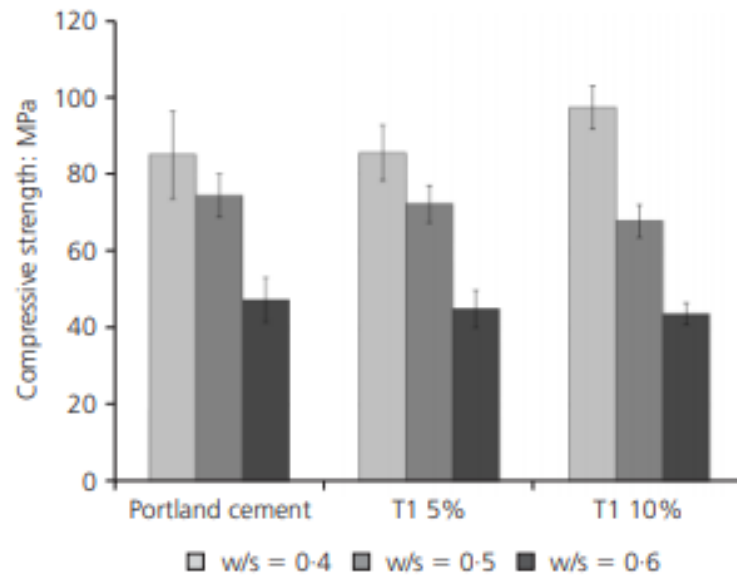
Acreditando a esto Ali Nazari²³ también realizó un estudio en el cual concluyó que la adición de TiO_2 dentro de la mezcla de concreto aumentaba sus propiedades mecánicas (Compresión y Flexión) hasta en un 3%, con valores mayores a este, empezaba a disminuir dicha propiedad en donde el dióxido de titanio únicamente cumplía la función de reemplazar al cemento pero no ofrece resistencia, esto, es algo en lo que se coincide con el estudio de Li Zhen ya que, como se puede observar en la (Figura 11), la muestra T3 contiene un porcentaje de 3.88% de TiO_2 notándose una disminución tanto en resistencia a compresión como a flexión. Así mismo, Be Yeon Lee.² realizó un ensayo en 2015 sobre la influencia que el TiO_2 genera sobre las propiedades de los materiales a base de cemento en el cual utilizó distintas relaciones de agua/sólidos (w/s) confirmando así que una adición de 10% de TiO_2 reemplazada en masa del cemento presenta una mayor resistencia a la compresión a los 28 días de edad como se muestra en la (Figura 12). Ese mismo año Abella.⁴ realizó un estudio sobre las propiedades de los materiales a base de cemento con contenido de TiO_2 en los cuales fueron comparadas dosificaciones de 5% y 1% del compuesto con una muestra convencional de referencia y otra elaborada con cemento Italcementi, el cual es un cemento fotocatalítico estandarizado. Obteniendo resultados reveladores, pues las muestras de ensayo con adición de TiO_2 (1% y 5%), fueron las que presentaron mejores resistencias a compresión a los 28 días de edad con valores de 34.8 Mpa y 37.5 Mpa respectivamente, en comparación a la muestra de referencia y al concreto fotocatalítico de Italcementi. Por otra parte, la resistencia a la flexo-tracción presentó sus mayores valores a los 7 y 28 días en la muestra de referencia y la muestra con presencia de dióxido de titanio a un 5% en masa respectivamente (Figura 13 y 14), aumentando la inclinación por la muestra con un 5% de dióxido de titanio, mostrándose como la más eficaz en ambos casos.

² Lee, B. Y., Jayapalan, A. R. & Kurtis, K. E. Effects of nano- TiO_2 on properties of cement-based materials. *Mag. Concr. Res.* **65**, 1293–1302 (2013).

⁴ Abella, G. Mejora de las propiedades de materiales a base de cemento que contienen TiO_2 : propiedades autolimpiantes. *Univ. Politécnica Madrid* 1–79 (2015).

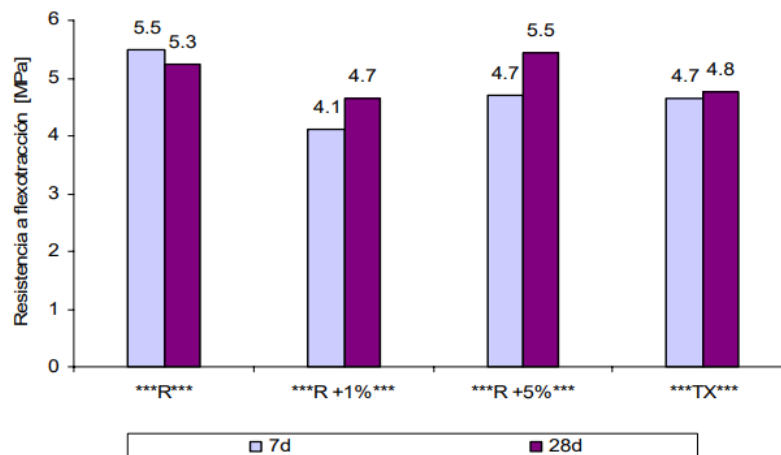
²³ Nazari, A. & Riahi, S. TiO_2 nanoparticles effects on physical, thermal and mechanical properties of self compacting concrete with ground granulated blast furnace slag as binder. *Energy Build.* **43**, 995–1002 (2011).

Figura 12. Resistencia a la compresión con diferentes relaciones de w/s. A distintas dosificaciones de TiO_2 (0, 5, y 10%).



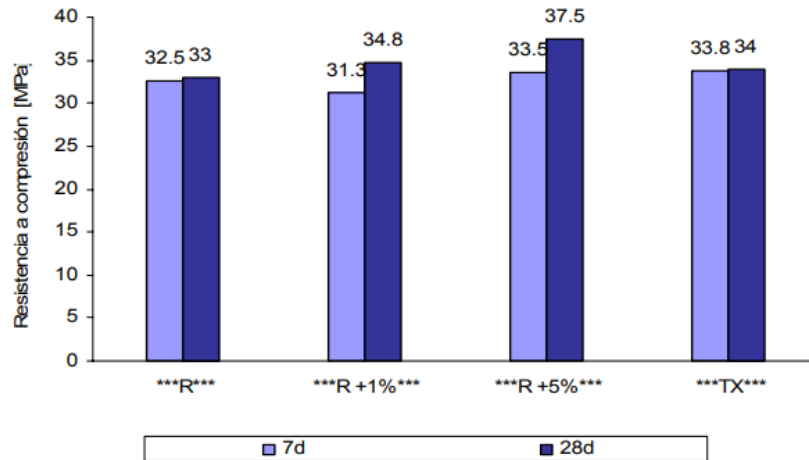
. Fuente: Nazari, A. (2011).

Figura 13. Resistencias a flexo-tracción en muestras con distintas dosificaciones de TiO_2 (1 Y 5%)



Fuente: Abella, G. (2015)

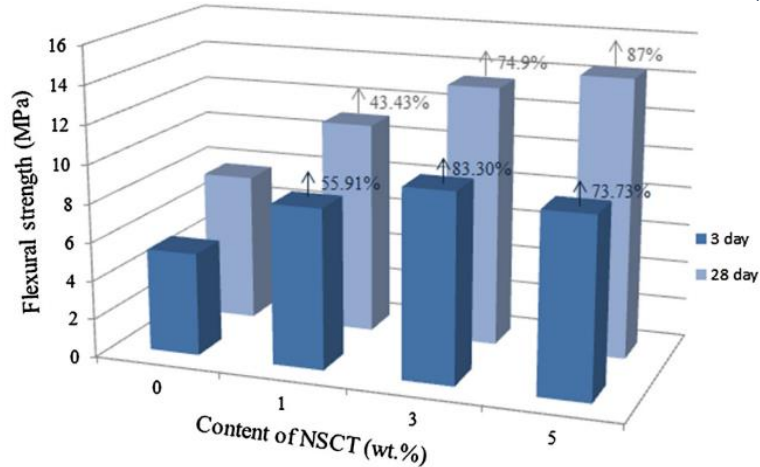
Figura 14. Resistencias a compresión en muestras con distintas dosificaciones de TiO_2 (1 Y 5%).



Fuente: Abella, G. (2015)

Baoguo Han, et al.²⁴ Corroboran estos resultados puesto que realizaron en el año 2017 un estudio sobre hormigón en polvo reactivo con adiciones de TiO_2 , mostrando mejoras en las resistencias a flexión y compresión a dos distintas edades de curado como se evidencia en la (Figura 15 y 16), siendo la mezcla con contenido de 3% en masa la más óptima con respecto a estas dos propiedades pues aumento en un 12.26% y 74.9% en la resistencia a compresión y flexión respectivamente, en comparación con la muestra convencional sin presencia de compuesto.

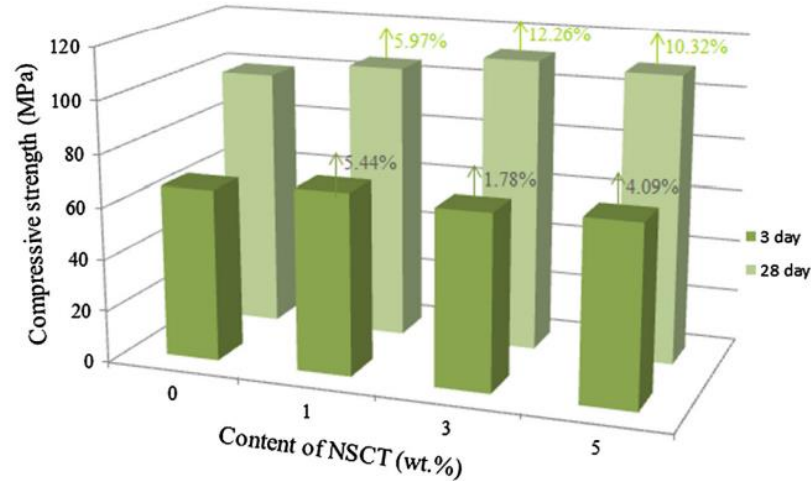
Figura 15. Resistencias a flexión en muestras con distintas dosificaciones de TiO_2 (0, 1, 3 Y 5%).



Fuente: Baoguo, H, et al. (2017)

²⁴ Han, B. et al. Reactive powder concrete reinforced with nano SiO_2 -coated TiO_2 . *Constr. Build. Mater.* **148**, 104–112 (2017).

Figura 16. Resistencias a compresión en muestras con distintas dosificaciones de TiO_2 (0, 1, 3 Y 5%).



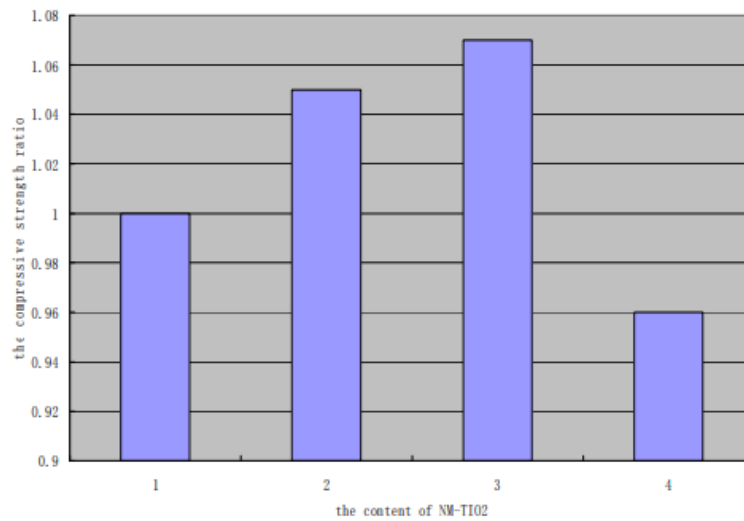
Fuente: Baoguo, H, et al. (2017)

al igual que en los ensayos nombrados anteriormente, en 2012 Zhiyong Deng²⁵ realizo un estudio con bloques de concreto a base de cemento portland y dosificaciones de TiO_2 , realizo un total de 36 muestras, donde escogió 12, realizando en ellas ensayos a compresión a 3 edades diferentes de curado. Partiendo de esto, los resultados finales mostraron una mejoría en la resistencia en muestras con porcentajes en masa mínimos de TiO_2 , siendo esto un aspecto interesante, ya que puede ser un indicador de la dosificación a utilizar en la matriz de concreto. En la (Figura 17) se evidencian las máximas resistencias obtenidas en el ensayo con porcentajes de 0.5%, 0.75% y 1%. Finalmente, María Vittoria Diamanti¹⁰ en 2013 realizo un artículo en el cual constata que se produce una disminución a la resistencia a la compresión en mezcla de concreto con adiciones de TiO_2 , puesto que como se muestra en la Figura 18 la resistencia a la compresión presenta su valor máximo en mezclas sin presencia de dióxido de titanio.

¹⁰ Diamanti, M. V., Lollini, F., Pedferri, M. P. & Bertolini, L. Mutual interactions between carbonation and titanium dioxide photoactivity in concrete. *Build. Environ.* **62**, 174–181 (2013).

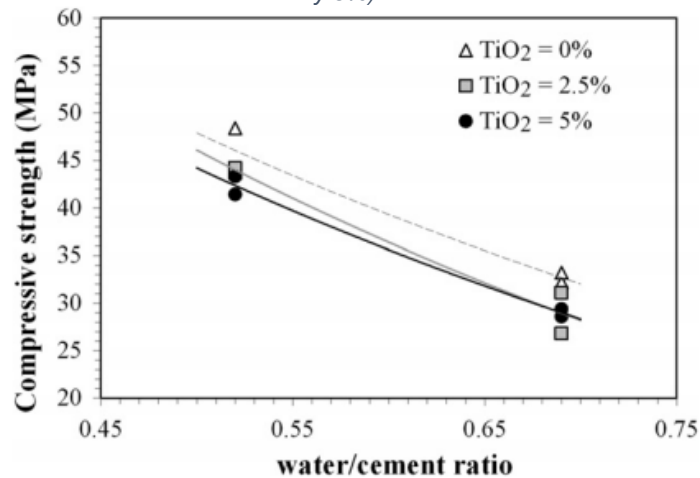
²⁵ Deng, Z. Mechanical properties research on concrete block doped nano-TiO₂ under the conditions of common conservation. *Appl. Mech. Mater.* **238**, 9–12 (2012).

Figura 17. Resistencia a compresión a distintas dosificaciones de TiO_2 (0, 0.5, 0.75 y 1%).



Fuente: Deng, Z. (2012)

Figura 18. Resistencia a compresión en función de su relación w/c. Con distintas dosificaciones de TiO_2 (0, 2.5 y 5%).



Fuente: Diamanti, M.V. (2012)

De acuerdo a esta revisión bibliográfica, es notable la variación en los resultados, ya que, aun así, se presente una tendencia de aumento en la mejora de las propiedades mecánicas, esto está sujeto a la proporción de dióxido de titanio utilizado en la matriz del material, donde se puede observar en los ensayos como los de Abella⁴ y Diamanti¹⁰, en donde se coincide en los porcentajes de dióxido de

⁴ Abella, G. Mejora de las propiedades de materiales a base de cemento que contienen TiO_2 : propiedades autolimpiantes. *Univ. Politécnica Madrid* 1–79 (2015).

¹⁰ Diamanti, M. V., Lollini, F., Pedferri, M. P. & Bertolini, L. Mutual interactions between carbonation and titanium dioxide photoactivity in concrete. *Build. Environ.* **62**, 174–181 (2013).

titanio empleado (5%) y mientras en el primero se da un aumento en comparación a las muestras de referencia, la muestra de Diamanti¹⁰ fue la que presento un menor valor en comparación con las demás muestras, aun presentando la muestra de Diamanti¹⁰ una mayor resistencia a la compresión (42 Mpa) que la muestra de Abella⁴ (37.5 Mpa). Al igual sucede con Abella⁴ y Deng²⁵, donde los dos utilizaron porcentajes de 1% en masa de TiO_2 y se dan valores con diferencias importantes pues mientras la muestra de Abella obtuvo un valor de 34.8Mpa, la muestra de Deng²⁵ tuvo una resistencia de 44Mpa, caso similar sucede con las resistencias a flexión, donde se es comparable las muestras realizadas por Han²⁴ y Abella⁴, cada una con porcentajes de 5% de TiO_2 en mezcla y resistencias de 14 Mpa y 5.5 Mpa, siendo estas en cada investigación las que cuentan con los mejores resultados sobre esta propiedad mecánica, la diferencia de valores entre un ensayo y otro, claro está, se da debido a la diferencia de materiales base ya que Han realizo este ensayo en hormigón con polvo reactivo el cual es utilizado para alcanzar altas resistencias, en cambio Abella⁴ empleo una mezcla convencional con cemento portland. Las fluctuaciones en los resultados en general pueden asumirse como indicadores negativos de estandarización del material, siendo necesario realizar más investigaciones y ensayos respecto a estas temáticas para encontrar un patrón base. Así mismo, se nota una tendencia a utilizar pequeños porcentajes del compuesto como adición para notar resultados más veraces.

1.6.3.2 PROPIEDADES DE DURABILIDAD

Las propiedades de durabilidad del cemento están estrechamente relacionadas con las exposiciones al medio ambiente que sufren, generando deterioros por causas físicas, químicas y mecánicas. Estas propiedades se ven reflejadas más directamente en la forma, calidad y las propiedades estéticas y de servicio del material o estructura en dicho caso.¹³ escrito esto, y concorde a las propiedades fotocatalíticas que presenta el dióxido de titanio se busca encontrar evaluaciones

⁴ Abella, G. Mejora de las propiedades de materiales a base de cemento que contienen TiO_2 : propiedades autolimpiantes. *Univ. Politécnica Madrid* 1–79 (2015).

¹⁰ Diamanti, M. V., Lollini, F., Pedferri, M. P. & Bertolini, L. Mutual interactions between carbonation and titanium dioxide photoactivity in concrete. *Build. Environ.* **62**, 174–181 (2013).

¹³ Diego, S. G. *Tecnología del concreto y del mortero*. (1993).

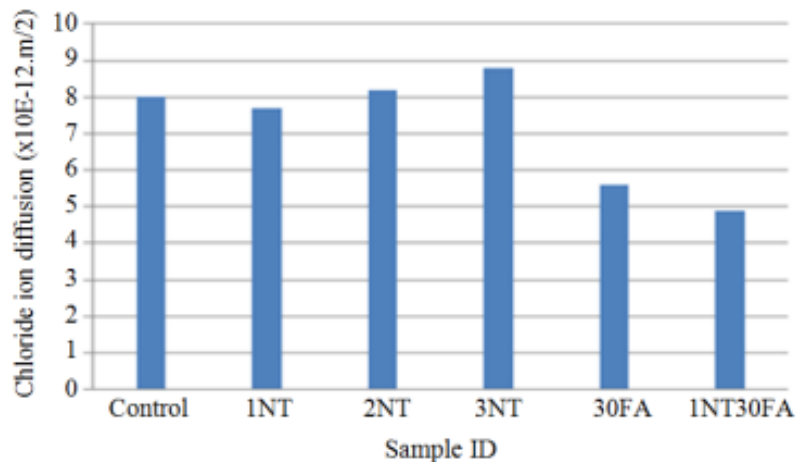
²⁴ Han, B. et al. Reactive powder concrete reinforced with nano SiO_2 -coated TiO_2 . *Constr. Build. Mater.* **148**, 104–112 (2017).

²⁵ Deng, Z. Mechanical properties research on concrete block doped nano- TiO_2 under the conditions of common conservation. *Appl. Mech. Mater.* **238**, 9–12 (2012).

de las propiedades de durabilidad como resistencias a carbonatación, cloruros y velocidad de corrosión en materiales cementantes con adiciones de TiO_2 .

Mohseni²⁶ realizó una evaluación de la difusión del ion cloruro dentro de mezclas de concreto con adiciones de dióxido de titanio, estas fueron comparadas con una muestra de control y mezclas con adiciones de ceniza volátil, obteniendo resultados

Figura 19. Difusión ion cloruro entre mezclas con distintas dosis de TiO_2 en mezclas. (1%, 2% y 3%), mezclas con cenizas volantes (30%) y muestra control.



Fuente: Mohseni, E, et al. (2015)

desfavorables para las muestras con porcentajes de TiO_2 dentro de la matriz de concreto donde aun así se obtuvo una denotación de resistencia a la penetración de cloruros de “high” debido a que los valores de difusión del ion cloruro se

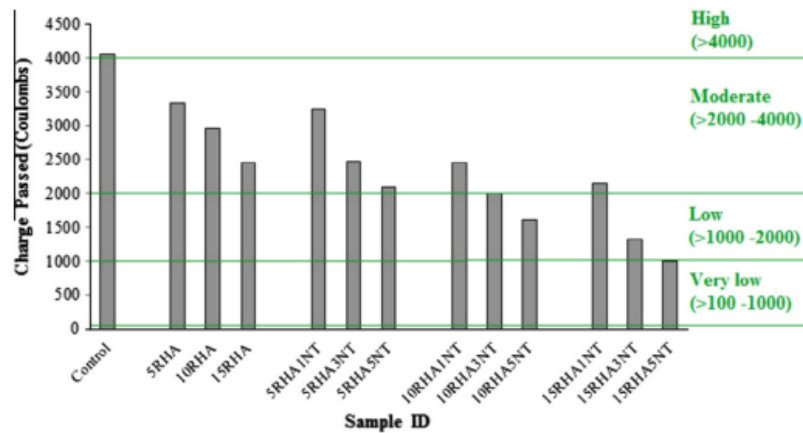
mantuvieron entre el rango 5-10 para todos los porcentajes de TiO_2 , pero fue la que menor resistencia presento en comparación a las demás muestras como se puede evidenciar en la (Figura 19). Aparte de esto, el mismo Mohseni²⁷ realizó un ensayo en el cual ensayo muestras con adiciones de TiO_2 y cenizas de cascarilla de arroz (RHA) obteniendo resultados inversos en comparación con el estudio de la ceniza volátil²⁶ en este estudio se pueden ver una mejora en la resistencia a la penetración de cloruros en comparación con las muestras de referencia y las mezclas realizadas con diferentes cantidades de RHA, vale aclarar que la mayor penetración se da con

²⁶ Mohseni, E., Ranjbar, M. M. & Tsavdaridis, K. D. Durability properties of high-performance concrete incorporating nano- TiO_2 and fly ash. *Am. J. Eng. Appl. Sci.* **8**, 519–526 (2015).

²⁷ Mohseni, E., Naseri, F., Amjadi, R., Khotbehsara, M. M. & Ranjbar, M. M. Microstructure and durability properties of cement mortars containing nano- TiO_2 and rice husk ash. *Constr. Build. Mater.* **114**, 656–664 (2016).

la presencia de estas dos adiciones dentro de la mezcla con un 15% de RHA y 5% de TiO_2 , en la (Figura 20). se denota gráficamente los resultados y la denotación que recibe cada mezcla a la penetración de cloruros.

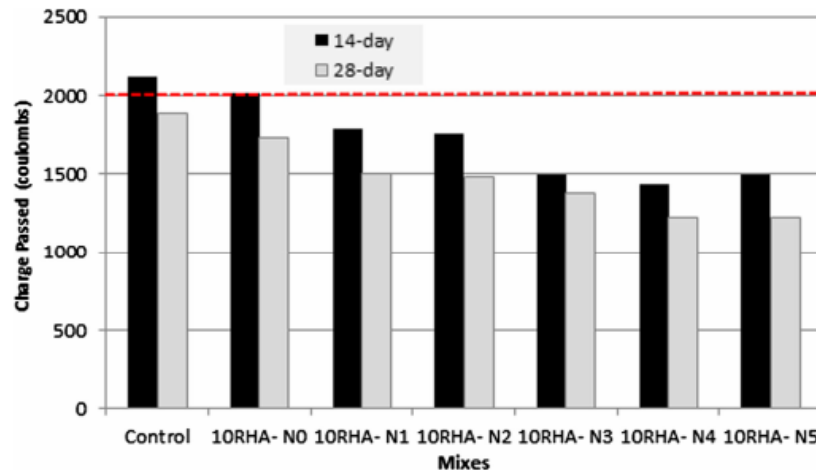
Figura 20. Resistencia a la penetración de cloruros para muestras con distintas adiciones de TiO_2 , RHA conjuntas y muestra comparación.



Fuente: Mohseni, E., et al. (2015)

Un estudio más reciente (2019)²⁸ realizó un estudio similar al de Mohseni donde también se probaron las propiedades mecánicas y de durabilidad en mezclas con presencia de dióxido de titanio y ceniza de cascarilla de arroz, se elaboraron siete muestras (Figura 21). Una mezcla de control sin presencia de ninguna de las dos

Figura 21. Resistencia a penetración de cloruros a 14 y 28 días de curado para muestras con adiciones de TiO_2 y RHA (Ceniza de cascarilla de arroz).

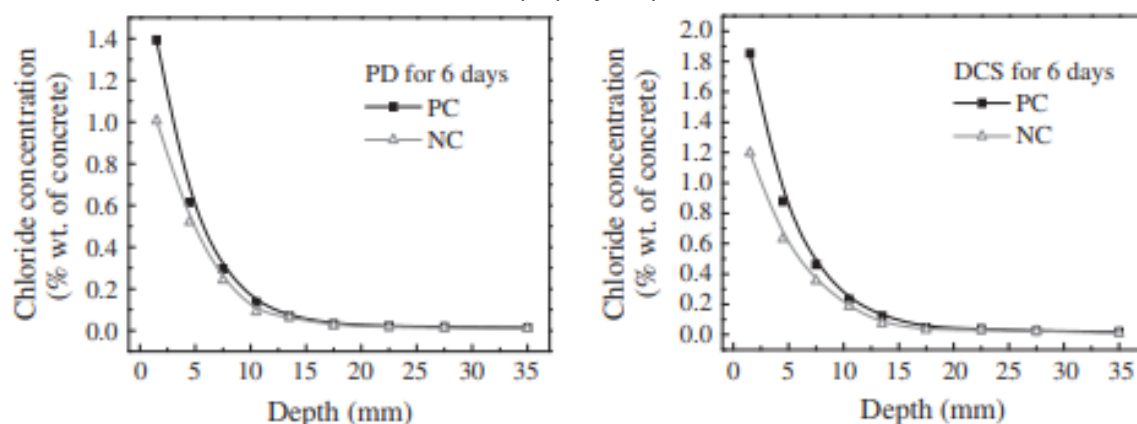


Fuente: Praveenkumar, T.R., et al (2019)

²⁸ Praveenkumar, T. R., Vijayalakshmi, M. M. & Meddah, M. S. Strengths and durability performances of blended cement concrete with TiO_2 nanoparticles and rice husk ash. *Constr. Build. Mater.* **217**, 343–351 (2019).

adiciones de estudio, los seis restantes contaban con porcentajes en masa del 10% de RHA con dosificaciones de TiO_2 de 0%, 1%, 2%, 3%, 4% y 5%. Todas las muestras que contenían presencia de dióxido de titanio presentaron penetraciones de cloruros más bajas que la muestra control y la muestra sin adición de TiO_2 . Hui li realizo también en 2013.²⁹ un estudio del coeficiente de cloruros en mezclas de concreto convencional y otra muestra con 4.5% en masa de TiO_2 , en función del proceso de fraguado realizado al material (difusión propia y acoplado), los resultados demostraron que el fraguado puede tener un alto grado de influencia en la concentración de cloruros (*Figura 22*). ya que cuando el fraguado es por difusión propia se presenta una menor concentración inicial a una misma profundidad en comparación al fraguado acoplado, determinándonos así una menor presencia de ion cloruro.

Figura 22. Concentración ion cloruro para una muestra con 4.5% de TiO_2 a los 6 días de edad de curado en función propia y acoplada.



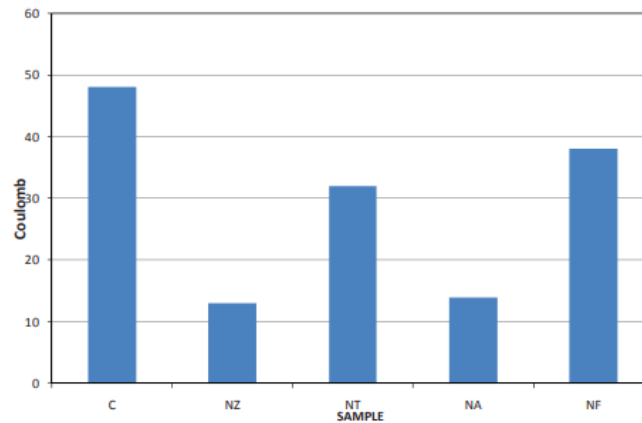
Fuente: Hui, L., et al. (2013)

Por último y no menos importante, Shekari³⁰ realizo un estudio en el 2011 en el cual evaluó la influencia que tienen las nanopartículas de TiO_2 dentro de las propiedades mecánicas y de durabilidad del hormigón de alto rendimiento, donde concluyo que las nanopartículas de TiO_2 tienen un impacto positivo en la mejora de las propiedades de durabilidad en comparación con las muestras de control de hormigón como se muestra en la *Figura 23*, la cual muestra los resultados de las muestras con incrustaciones de nanopartículas de distintos compuestos en comparación con la muestra control (C).

²⁹ Li, H., Xiao, H., Guan, X., Wang, Z. & Yu, L. Chloride diffusion in concrete containing nano- TiO_2 under coupled effect of scouring. *Compos. Part B Eng.* **56**, 698–704 (2014).

³⁰ Shekari, A. H. & Razzaghi, M. S. Influence of nano particles on durability and mechanical properties of high performance concrete. *Procedia Eng.* **14**, 3036–3041 (2011).

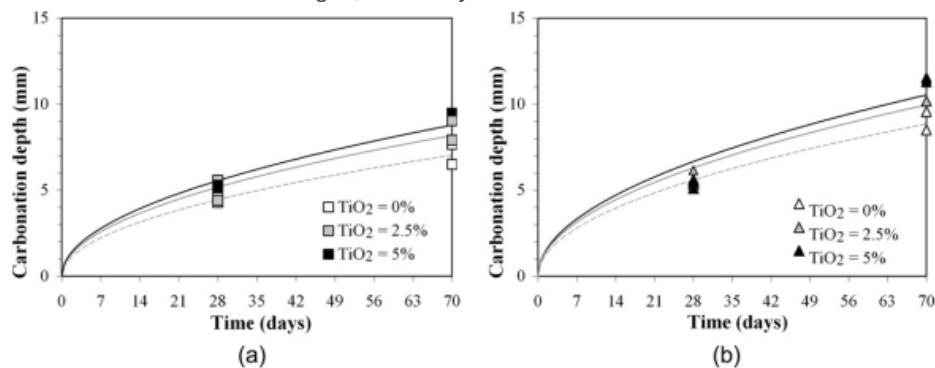
Figura 23. Resistencia a cloruros en muestras con 1.5% en masa de TiO_2 , ZrO_2 , Al_2O_3 , Fe_3O_4 .



Fuente: Shekari, A.H., et al (2011)

El fenómeno de la carbonatación se debe a la penetración del CO_2 proveniente del suelo o de la atmósfera hacia la matriz de concreto. Está determinada por distintos factores, como el curado, la porosidad, permeabilidad, la humedad del ambiente y temperatura. Los grandes investigadores del área de patología sugieren trabajar con relaciones de w/c menores a 0.5, caso contrario a Diamanti¹⁰ quien en su estudio sobre la interacción entre la carbonatación y las propiedades fotocatalíticas del TiO_2 utilizó muestras con relación w/c de 0.52 y 0.69, realizando tomas de la penetración de carbonatación a los 28 y 70 días, donde para una relación w/c de 0.69 y un porcentaje de 5% en masa del TiO_2 se obtuvo la máxima penetración a los 70 días con un valor de aproximadamente 9mm contra los 6mm que registro la mezcla de control sin presencia de TiO_2 (Figura 24). Por otra parte, para la muestra

Figura 24. Penetración de carbonatación para relaciones de w/c (a: 0.69 y b: 0.52), con distintos porcentajes de agua, a los 28 y 70 días de curado.



Fuente: Diamanti, M.V. (2012)

¹⁰ Diamanti, M. V., Lollini, F., Pedferri, M. P. & Bertolini, L. Mutual interactions between carbonation and titanium dioxide photoactivity in concrete. *Build. Environ.* **62**, 174–181 (2013).

con w/c de 0.52 también, la muestra con un 5% de TiO_2 demostró valores desfavorables para el compuesto, debido a que en este caso la penetración a los 70 días de curado fue mayor con una profundidad de aproximadamente 11mm. Estos resultados, indican así que el uso de TiO_2 dentro de la mezcla de concreto.

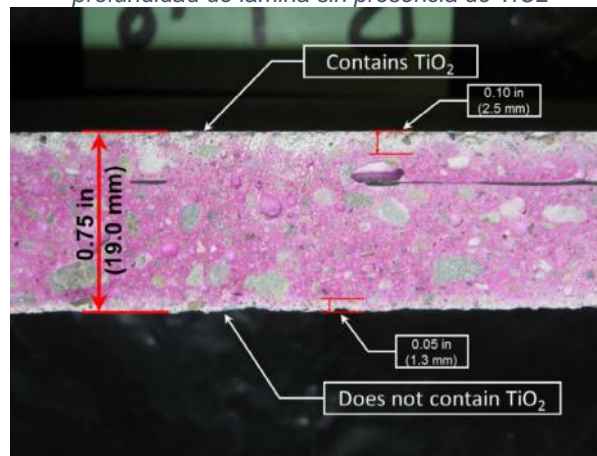
Tabla 7. Profundidades de carbonatación (mm) y coeficientes correspondientes a todas las mezclas.

Mix	$d_{\text{km}14\text{d}}$	$d_{\text{km}28\text{d}}$	$d_{\text{km}56\text{d}}$	$d_{\text{km}91\text{d}}$	K_c (mm/year ^{0.5})	R^2
1:1	<1	<1	<1	<1	1	–
NT1A (0.5%NT)	<1	<1	<1	<1	1	–
NT1B (0.75%NT)	<1	<1	<1	<1	1	–
NT1C (1.00%NT)	<1	<1	<1	<1	1	–
NS1P (0.75%NS)	<1	<1	<1	<1	1	–
NS1Q (1.50%NS)	3	4	5	6	11.94	0.973
NS1R (3.00%NS)	4	5	9	10	20.92	0.971
1:2	<1	<1	<1	<1	1	–
NT2A (0.5%NT)	<1	<1	<1	<1	1	–
NT2B (0.75%NT)	2	4	6	8	16.39	0.989
NT2C (1.00%NT)	3	4	5	6	11.94	0.990
NS2P (0.75%NS)	2	3	6	8	41.93	0.892
NS2Q (1.50%NS)	3	4	7	8	19.78	0.960
NS2R (3.00%NS)	5	15	16	20	16.36	0.941

Fuente: Rao, S., et al. (2015)


tiene un efecto negativo en esta propiedad de durabilidad, aun así, es importante verificar si con relaciones de w/c menores se puedan obtener resultados diferentes. S. Rao²⁰ también realizó un análisis de la carbonatación con muestras que contenían dosis de dióxido de titanio (TiO_2) y dióxido de Sílice (SiO_2) con morteros

Figura 25. Profundidad de carbonatación en lámina de concreto con adición de TiO_2 en comparación con profundidad de lámina sin presencia de TiO_2



Fuente: Bogutyn, S., et al. (2015)..

²⁰ Rao, S., Silva, P. & De Brito, J. Experimental study of the mechanical properties and durability of self-compacting mortars with nano materials (SiO_2 and TiO_2). *Constr. Build. Mater.* **96**, 508–517 (2015).

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	EFFECTO DE LA ADICIÓN DE DIÓXIDO DE TITANIO EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS Y DE DURABILIDAD EN MATERIALES A BASE DE CEMENTO	FECHA: 2020 VERSIÓN 0
--	---	--------------------------

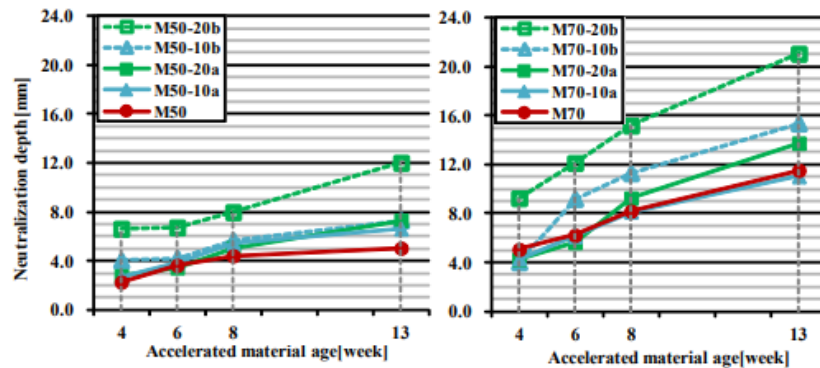
autocompactantes en las cuales, los resultados permitieron afirmar que las muestras control con relación aglutinante de arena de 1:1 y 1:2, además de la mezcla NT2A con 0.5% de TiO_2 , crean barreras casi impenetrables al CO_2 como se representa en la *Tabla 7* donde los valores de <1 representan valores deleznales a los cuales se les asignó un valor de $1\text{mm}/(0.5\text{años})$, esta reacción ocasiona un retraso significativo de la propagación del gas, además, estos morteros están asociados a propiedades de baja porosidad lo cual entorpece la ruta principal de CO_2 . Un caso contrario es el estudio de Shannon Bogutyn en 2015¹⁹ donde se realizó un análisis de muestras que contenían materiales fotocatalíticos como el TiO_2 en Salt Lake City, evaluando sus propiedades mecánicas y de durabilidad, en este estudio Bogutyn menciona que la penetración observada en una capa que contenía dióxido de titanio era casi del doble de profundidad que la muestra sin contenido de este (*Figura 25*), también se presume que este aumento en la carbonatación se da debido a la disminución en la capacidad fotocatalítica del compuesto químico, por ende, se recomienda realizar un análisis más profundo de las características físicas y químicas del compuesto TiO_2 .

En 2013 Hasebe & Edahiro de la universidad de Hokkaido¹⁸ realizaron un análisis experimental de las propiedades básicas del concreto usando dosificaciones de TiO_2 como adición de mezcla. En este estudio, Hasebe y compañía concluyeron con respecto a las propiedades de durabilidad, que los morteros con adiciones de TiO_2 (10%) tenían prácticamente la misma profundidad de carbonatación que los que no tenían presencia del compuesto químico. Por ende, el TiO_2 cumplía con la función de reemplazante de cemento y, además, beneficiaba en parte las propiedades de

¹⁸ Hasebe, M. & Edahiro, H. Experimental studies on basic properties of concrete using TiO_2 as admixture. *Proc. 13th East Asia-Pacific Conf. Struct. Eng. Constr. EASEC 2013* (2013)

¹⁹ Bogutyn, S., Arboleda, C., Bordelon, A. & Tikalsky, P. Rejuvenation techniques for mortar containing photocatalytic TiO_2 material. *Constr. Build. Mater.* **96**, 96–101 (2015).

Figura 26. Profundidad de penetración de carbonatación para todas las muestras con diferentes proporciones de TiO_2 (5%, 10%, 15% Y 20%).



Fuente: Hasebe, M., et al. (2013)

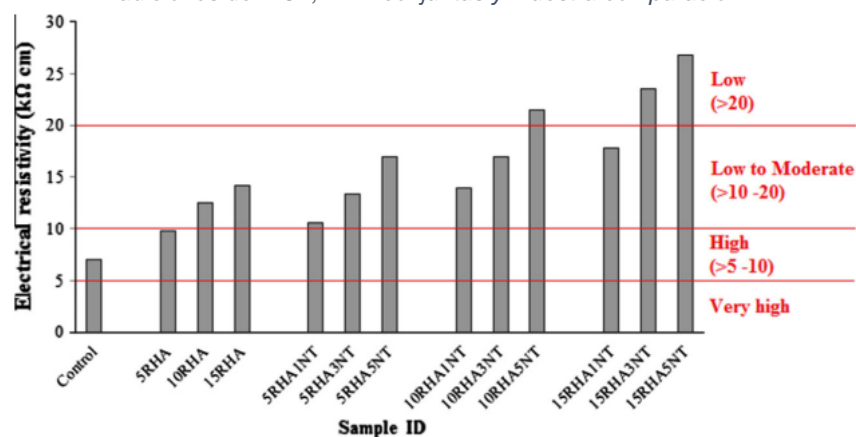
durabilidad y mecánicas, como la resistencia a la compresión la cual aumento entre el 7 – 27% cuando las muestras contenían adición de TiO_2 . Como se muestra en la Figura 26.

Los estudios de corrosión están muy relacionados con el ataque de cloruros, por ende, las referencias en este tramo del estado del arte coincidirán con los tratados en el ítem del ion cloruro.

Nuevamente Mohseni²⁷ en su estudio sobre las propiedades en materiales a base de cemento que contienen Nano- TiO_2 , presenta en la Figura 27 Los valores de resistividad eléctrica y como se puede observar el TiO_2 se vio muy favorecido con estos valores, ya que las muestras que contenían presencia de NT presenciaron mayores resistencias, por lo cual se daría una menor probabilidad de corrosión en el acero de refuerzo, las mezclas más óptimas fueron las que presentaban un 3% y 5% de TiO_2 con 15% de ceniza de cascarilla de arroz. Vale aclarar que estos

²⁷ Mohseni, E., Naseri, F., Amjadi, R., Khotbehsara, M. M. & Ranjbar, M. M. Microstructure and durability properties of cement mortars containing nano- TiO_2 and rice husk ash. Constr. Build. Mater. 114, 656–664 (2016).

Figura 27. Resistividad eléctrica y clasificación de la velocidad de corrosión para muestras con distintas adiciones de TiO_2 , RHA conjuntas y muestra comparación.



Fuente: Prieto, F. B. (2015).

estudios son dependientes de la resistencia a penetración de cloruros, puesto que este fenómeno son el punto de partida inicial para la corrosión, a menor resistencia se tenga en una mezcla a los cloruros, más fácilmente penetraran la barrera del material cementante y continuo a esto aumentara su velocidad de corrosión.

Actualmente en Colombia se han ido realizando estudios sobre el efecto en las propiedades mecánicas y de durabilidad que tienen las adiciones de TiO_2 en materiales cementantes, aun así, se encuentran limitados estudios enfatizados a evaluar las propiedades básicas del concreto con adiciones de TiO_2 como Benavides⁷ quien en 2015 concluyo disminuciones en la resistencia a compresión a los 28, 56 y 90 días para mezclas con adiciones de TiO_2 de edad de curado del material en comparación con las muestras convencionales, Cárdenas¹⁶ en 2012 realizo otro estudio sobre el impacto que tienen las propiedades físicas en el cemento con adiciones de TiO_2 en la cual concluyo un comportamiento homogéneo entre las mezclas patrón y las mezclas con adición de dióxido de titanio, ya que no se presentó una diferencia considerable en las propiedades mecánicas de ambas muestras. Segura y Camelo³¹ en 2019 quienes realizaron un estudio en concreto adicionado con TiO_2 para infraestructura vial en el cual concluyeron que la adición

⁷ Prieto, F. B. Efecto del dióxido de titanio (TiO_2) en la resistencia a la compresión del concreto autolimpiante en Colombia. (2015).

¹⁶ Cárdenas Ramírez, C. EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y FOTOCATALÍTICAS DE CEMENTO ADICIONADO CON NANOPARTÍCULAS DE DIÓXIDO DE TITANIO. 118 (2012).

³¹ DANY JULIETH, S. M. & DIEGO MAURICIO, C. M. EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FOTOCATALÍTICAS DE PREFABRICADOS PARA OBRAS DE INFRAESTRUCTURA VIAL EN CONCRETO ADICIONADO CON DIÓXIDO DE TITANIO (TiO_2). 82 (2019).

de TiO_2 en fase rutilo y anatasa afectan la resistencia a la compresión, pero, aun así, mencionan que el diseño sigue cumpliendo con los parámetros establecidos en el Norma Técnica Colombiana la cual es de 28Mpa. Con respecto a esta información, se desea ampliar, fomentar la investigación y el estudio de este material, para esto, se desea proporcionar un estudio veraz con resultados confiables y verídicos sobre el comportamiento que presentan las mezclas con distintas adiciones de dióxido de titanio.

1.6.4. MARCO LEGAL

- ICONTEC – Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación.
 - ✓ NTC 1486 - Presentación de trabajos de grado.
 - ✓ NTC 77 - Método de ensayo para el análisis por tamizado de los agregados finos y gruesos. (Granulometría)
 - ✓ NTC 176 - Método de ensayo para determinar densidad y la absorción del agregado grueso.
 - ✓ NTC 92 - Método de ensayo para la determinación de la densidad volumétrica (masa unitaria) y vacíos en agregados.
 - ✓ NTC 221 - Método de ensayo para determinar la densidad del cemento hidráulico.
 - ✓ NTC 112 – Mezcla mecánica de pastas de cemento y morteros de consistencia plástica.
 - ✓ NTC 110 - Método de ensayo para determinar la consistencia normal del cemento hidráulico.
 - ✓ NTC 118 - Método de ensayo para determinar el tiempo de fraguado del cemento hidráulico mediante el aparato Vicat.
 - ✓ NTC 5120 - Método de ensayo para solubilidad de materiales asfálticos en tricloroetileno.
 - ✓ NTC 3329 - Especificaciones del mortero para unidades de mampostería.
 - ✓ NTC 550 - Elaboración y curado de probetas cilíndricas.
 - ✓ NTC 1377 - Elaboración y curado de especímenes de concreto para ensayos de laboratorio.
 - ✓ NTC 220 - Determinación de la resistencia de morteros de cemento hidráulico a la compresión, usando cubos de 50mm o 2 pulgadas de lado.

- ✓ Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente – NSR 10 – Título C - Concreto Estructural.

- ASTM

- ✓ ASTM WK46877 - New Test Method for Standard test method for pigment loss on ignition.
- ✓ ASTM D6131 - 17. Standard Test Method for Evaluating the Relative Tint Undertone of Titanium Dioxide Pigments.
- ✓ ASTM D476 - 15. Standard Classification for Dry Pigmentary Titanium Dioxide Products.
- ✓ ASTM G59 – 97 - Standard Test Method for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements


- NT BUILD

- ✓ CONCRETE, MORTAR AND CEMENT-BASED REPAIR MATERIALS: Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments.

1.7. METODOLOGÍA

FASE 1 – Caracterización de materia prima y mezcla de mortero con bajas dosis de dióxido de titanio

1. En primaria instancia se realiza la obtención de los materiales para la mezcla de mortero, como lo son: el cemento Portland, agregados, agua de mezclado, y dióxido de titanio en polvo.
2. En el laboratorio de materiales de la Universidad Católica se procede a realizar:
 - 2.1 Caracterización del cemento por medio del ensayo de densidad.
 - 2.2 Caracterización del dióxido de titanio por medio del ensayo de densidad.
 - 2.3 Caracterización de los agregados por medio de los ensayos de densidad, granulometría, y masa unitaria para los agregados finos y gruesos.

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	EFFECTO DE LA ADICIÓN DE DIÓXIDO DE TITANIO EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS Y DE DURABILIDAD EN MATERIALES A BASE DE CEMENTO	FECHA: 2020 VERSIÓN 0
--	---	--------------------------

3. Ya caracterizados los materiales, se realizarán 4 diseños por separado, con el fin de tener una muestra control y en los 3 restantes hacer la dosificación porcentajes diferentes de dióxido de titanio (1%, 2% y 3% de TiO_2).
4. Ya preparadas las mezclas de concreto con las respectivas adiciones de dióxido de titanio, se procede a realizar los siguientes ensayos sobre la mezcla de mortero:
 - 4.1 Determinación de la consistencia normal y tiempos de fraguado para la mezcla de mortero.
5. Ya elaborados los ensayos se inicia el proceso de elaboración de las muestras de mortero con sus respectivos porcentajes de TiO_2 .

FASE 2 – Determinación de las propiedades mecánicas

6. Ya curadas las muestras de mortero, se procede a realizar los ensayos de las propiedades mecánicas, lo cual son:
 - 6.1 Determinación de la resistencia a la compresión para 3 muestras de mortero por cada porcentaje de TiO_2 .

FASE 3 – Determinación de las propiedades de durabilidad

7. Ya evaluadas las propiedades mecánicas, se procede a realizar los ensayos de durabilidad, lo cual son:
 - 7.1 Determinación de la penetración de cloruros para cada una de las muestras de mortero, donde se evaluarán en total las 3 muestras por cada porcentaje de TiO_2 .
 - 7.2 Determinación de la velocidad de corrosión para cada una de las muestras de mortero, donde se evaluará por cada porcentaje de TiO_2 .

FASE 4 – Análisis de los resultados

8. Ya realizados los ensayos de caracterización de los materiales, ensayos en estado fresco de la pasta y propiedades mecánicas y de durabilidad de cada una de las mezclas se procede a clasificar, analizar y concluir los datos obtenidos en cada una de las evaluaciones a realizar durante la investigación.

2. CARACTERIZACIÓN DE MATERIAS PRIMAS

2.1. AGREGADOS

Tamizado/Granulometría

El tamizado es usado comúnmente en los diseños de mezcla para poder conocer y determinar la distribución del tamaño de partículas de un material de agregado. Para este ensayo nos regimos bajo los parámetros de la norma NTC 77, la cual menciona el procedimiento a seguir donde por medio de una serie de tamices reducidos en sus aberturas continuamente se separa el material de agregado³². A continuación, se puede observar los resultados granulométricos obtenidos en la siguiente tabla.

Tabla 8. Tabla granulométrica, resultados ensayo NTC 77

TAMIZ	DIAMETRO	PESO RETENIDO	PORCENTAJE RETENIDO	PORCENTAJE RETENIDO ACUMULADO	PORCENTAJE QUE PASA
	mm	g	%		
3/8	9.52	0	0	0	100
4	4.76	3.23	1.08782778	1.08782778	98.91217222
8	2.36	148.322	49.95318636	51.04101414	48.95898586
16	1.18	95.7	32.23068685	83.27170099	16.72829901
30	0.6	34.64	11.66636356	94.93806454	5.061935458
50	0.3	10.12	3.408302517	98.34636706	1.653632941
100	0.15	3.3	1.111402995	99.45777005	0.542229946
Fondo		1.61	0.542229946	100	0

Fuente: Propia.

³² Técnicas, I.-I. C. de N. NTC 77 Método para el análisis por tamizado de los agregados finos y gruesos. Icontec 12 (1994).

El ensayo se realizó con una muestra de material fino de 300 g, del cual se obtuvo un total de 296.922 g registrados en la suma acumulada de material por cada tamiz, obteniendo un porcentaje de eficacia en el desarrollo de la prueba de del 98.97%, aun así, para el diseño de la mezcla se realiza un ajuste granulométrico con el fin de obtener resultados más veraces.

Tabla 9. Límites superiores e inferiores curva granulométrica, según NTC 77

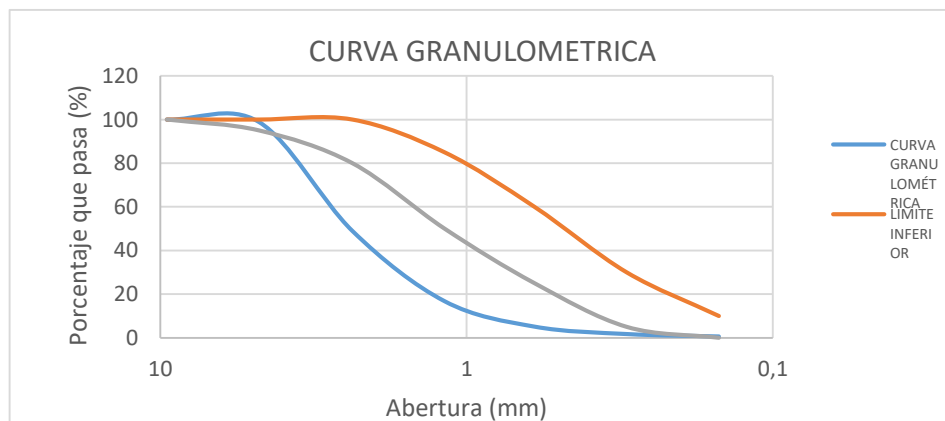
LIM. INFERIOR	LIM. SUPERIOR	DENOMINACIÓN
100	100	GRAVILLA
95	100	ARENA
80	100	
50	85	
25	60	
5	30	
0	10	

Fuente: Propia.

En la tabla anterior se denotan los valores obtenidos en el ensayo para cada uno de los tamices utilizados desde el tamiz 3/8 hasta el tamiz N°100, en estos obtuvimos el mayor porcentaje de material retenido en el tamiz N°8, el cual maneja un porcentaje del 49.95%, correspondiente aproximadamente a la mitad de la muestra presente en este tamiz. Esto nos generó una escala logarítmica en la granulometría, mostrada en la Figura 29, así mismo, la curva granulométrica delimitada con los límites correspondientes a cada tamiz como se puede observar en la Tabla 9.

- Curva granulométrica

Figura 28. Gráfico curva granulométrica



Fuente: Propia.

Para el cálculo del módulo de finura se utilizó la suma total del porcentaje retenido acumulado Tabla 9 y se dividió entre el valor de 100, como lo indica la norma NTC 77³².

$$\text{Modulo de finura} = \frac{\sum \text{Porcentaje acumulado}}{100}$$

$$\text{Modulo de finura} = \frac{0 + 1.09 + 51.04 + 83.27 + 94.94 + 98.35 + 99.46}{100}$$

$$\text{Modulo de finura} \approx 4.281$$

Densidad de los agregados

La densidad es la relación que existe entre la masa de un material (en el aire) y el volumen de este mismo, así mismo la NTC 176³³, hace referencia a los conceptos de aparente y nominal, lo cual hace referencia a los valores en condiciones ideales en el cual se considera el volumen del material. Para este ensayo los valores de masa para cada una de las condiciones anteriormente descritas se muestran en la Tabla 10, donde se obtuvo un peso inicial de 508.4 g, peso seco en aire (A) de 500g, peso seco y suturado superficialmente (B) de 521.2g y finalmente un peso saturado (C) de 311.2 g.

Tabla 10. Tabla abreviaturas peso inicial, peso seco en aire, peso SSS y peso saturado.

ABREVIATURA	UNIDADES	VALOR
A	g	500
B	g	521.2
C	g	311.2
D	g	508.4

Fuente: Propia.

³² Técnicas, I.-I. C. de N. NTC 77 Método para el análisis por tamizado de los agregados finos y gruesos. Icontec 12 (1994).

³³ Técnicas, I.-I. C. de N. Norma Técnica Colombiana NTC 176: Método de ensayo para determinar la densidad y la absorción del agregado grueso. 14 (1995).

Con estos valores se procede a realizar los cálculos solicitados por la norma a una temperatura ambiente (23°C), obteniendo así, los siguientes resultados:

- Densidad nominal

$$Densidad\ nominal = \frac{A}{A - C} \times 0.9975 \left(\frac{g}{cm^3} \right)$$

$$Densidad\ nominal = \frac{500\ g}{(500 - 311.2)\ g} * 0.9975 \left(\frac{g}{cm^3} \right)$$

$$Densidad\ nominal = 2.641\ g/cm^3$$

- Densidad aparente (Gravedad específica de Bulk)

$$Densidad\ aparente = \frac{A}{B - C} * 0.9975 \left(\frac{g}{cm^3} \right)$$

$$Densidad\ nominal = \frac{500\ g}{(521.2 - 311.2)\ g} * 0.9975 \left(\frac{g}{cm^3} \right)$$

$$Densidad\ nominal = 2.375\ g/cm^3$$

- Densidad SSS

$$Densidad\ SSS = \frac{B}{B - C} * 0.9975 \left(\frac{g}{cm^3} \right)$$

$$Densidad\ SSS = \frac{521.2\ Kg}{(521.2 - 311.2)\ Kg} * 0.9975 \left(\frac{g}{cm^3} \right)$$

$$Densidad\ SSS = 2.476\ g/cm^3$$

De acuerdo con los resultados obtenidos anteriormente para cada densidad, la norma expresa la siguiente condición en la que $D_{aparente} < D_{sss} < D_{nominal}$, para afirmar la congruencia de los datos obtenidos, la cual de acuerdo con los resultados obtenidos se cumpliría y tendría coherencia con respecto a los datos iniciales.

Absorción y humedad de los agregados

Al igual que en la propiedad anteriormente tratada, la absorción y el porcentaje de humedad son características fundamentales en los agregados para poder desarrollar un adecuado diseño de mezcla, el ensayo para esta propiedad se manejó con la misma norma que la densidad (NTC 176)³³ y sus cálculos de desarrollan a continuación:

- Absorción

$$\% \text{ de absorción} = \frac{B - A}{A} * 100$$

$$\% \text{ de absorción} = \frac{(0.5212 - 0.5) \text{ Kg}}{0.5 \text{ Kg}} * 100$$

$$\% \text{ de absorción} = 4.240$$

- Porcentaje de Humedad (w)

$$\% \text{ de humedad} = \frac{D - A}{A} * 100$$

$$\% \text{ de humedad} = \frac{0.5084 - 0.5}{0.5} * 100$$

$$\% \text{ de humedad} = 1.680 \%$$

³³ Técnicas, I.-I. C. de N. Norma Técnica Colombiana NTC 176: Método de ensayo para determinar la densidad y la absorción del agregado grueso. 14 (1995).

Masas unitarias

La masa unitaria hace referencia a la masa por unidad de volumen, en el caso de este ensayo, determinado por la norma NTC 92³⁴, se desea obtener el valor de una muestra de agregado determinada, con un volumen (V) de 0.00302 m³ en un molde con las dimensiones especificadas por la norma. Los valores obtenidos de masa unitaria compacta (MUC) y masa unitaria suelta (MUS) se pueden observar en la Tabla 11, con pesos secos de 4.773 Kg y 4.195 Kg respectivamente.

$$\text{Masa Unitaria} = \frac{\text{Peso seco del agregado}}{\text{Volumen}}$$

Tabla 11. Tabla abreviaturas y valores de masa unitaria compacta, suelta y volumen.

PROPIEDAD	UNIDADES	VALOR
MUS	Kg/m ³	1389.07
MUC	Kg/m ³	1580.46
V	m ³	0.00302

Fuente: Propia.

Con respecto a estos valores obtenidos y en conjunto con valores calculados anteriormente, se procede a calcular el porcentaje de vacíos de la muestra de acuerdo con las fórmulas expresadas en la norma:

$$\% \text{ Vacios} = (100\%) * \frac{(S * W) - M}{S * W}$$

Donde:

M : Masa unitaria del agregado $\left[\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right]$

S : Gravedad específica de Bulk

W : Densidad del agua $\left[998 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right]$

³⁴ Técnicas, I.-I. C. de N. Norma Técnica Colombiana 92. Ingeniería Civil y Arquitectura. Determinación de la masa unitaria y los vacíos entre partículas y agregados. (1995).

$$\% \text{ Vacios} = (100\%) * \frac{(2.381 * 998 \text{ Kg/m}^3) - 1580.46 \text{ Kg/m}^3}{2.381 * 998 \text{ Kg/m}^3}$$

$$\% \text{ Vacios} = 33.49 \%$$

2.2. CEMENTO

El cemento es un aglomerante fundamental en las mezclas de diseño, ya que es gracias a este material que se brinda la propiedad de poder unir los materiales implementados en la mezcla de concreto, este material al entrar en contacto con el agua nos brinda dureza y al entrar en interrelación con los demás componentes produce el compuesto en estudio de este proyecto, el concreto³

Para la caracterización de este material se realizaron ensayos para la determinación de sus propiedades fundamentales, entre las cuales encontramos la densidad, consistencia normal y tiempos de fraguado.

Densidad

En el ensayo de densidad establecido por la NTC 221, se establecen los parámetros y requerimientos establecidos para la realización de dicha actividad a la cual, al ser esta una prueba realizada sobre la pasta de cemento, se tomaron 3 muestras de un mismo material con las mismas características de fabricación para poder generar así una muestra “promedio” con respecto al comportamiento que se presenta en cada uno³⁵. Los resultados necesarios para desarrollar los cálculos solicitados por la norma se muestran en la *Tabla 12* para su respectiva muestra.

Tabla 12. Valores obtenidos ensayo NTC 221.

PROPIEDAD	UNIDADES	PRUEBA		
		1	2	3
Peso del cemento	g	64	64	64
	kg	0.064	0.064	0.064
Volumen inicial líquido, Vi	cm3	0	0	0
	m3	0	0	0
Volumen final líquido, Vf	cm3	21.2	21.5	21
	m3	0.0000212	0.0000215	0.000021
Temperatura	°C	21	21	21

Fuente: Propia.

³ Ricardo, M. R. EL CONCRETO FUNDAMENTOS Y NUEVAS TECNOLOGÍAS. (2019)

³⁵ Técnicas, I.-I. C. de N. NTC 221 Método de ensayo para determinar la densidad del cemento hidráulico. 1–8 (2011).

El valor de la densidad y la densidad relativa se obtienen de acuerdo con las fórmulas encontradas en la normatividad, para las cuales se considera el volumen desplazado como la diferencia entre la lectura final (Vf) y lectura inicial (Vi), asumiendo siempre una Vi de 0m³ para cada una de las muestras, y un peso del cemento de 64g, igualmente para cada una de las muestras de ensayo como se muestra en la tabla 12. Por otra parte, se asume una densidad del agua a 4°C de 1g/cm³ para el cálculo de la densidad relativa, finalmente como se observa en la Tabla 13, se calcula un promedio de los tres valores para cada uno de los resultados finales.

- Densidad

$$\text{Densidad} = \frac{\text{Masa del cemento (g)}}{\text{Volúmen desplazado (cm}^3\text{)}}$$

- Densidad relativa

$$\text{Densidad relativa} = \frac{\text{Densidad del cemento } \left(\frac{g}{cm^3}\right)}{\text{Densidad del agua a 4}^\circ\text{C } \left(\frac{g}{cm^3}\right)}$$

Tabla 13. Valores Densidad y Densidad relativa.

PROPIEDAD	UNIDADES	PRUEBA			PROMEDIO
		1	2	3	
DENSIDAD	g/cm ³	3.019	2.977	3.048	3.014
DENSIDAD RELATIVA	ADIM	3.019	2.977	3.048	3.014

Fuente: Propia.

Consistencia normal

El ensayo de consistencia en el cemento se desarrolló con respecto a la NTC 110, esta norma establece un ensayo no sobre el polvo de cemento, como en el caso de la densidad, sino sobre la pasta, esta se prepara con una masa de cemento de 650g y un porcentaje de agua asumido arbitrariamente en la prueba, como lo muestra la tabla 14, representando los datos iniciales se asumieron 3 valores diferentes en el

volumen del agua, variados en diferenciales de 10ml para cada muestra con un rango entre los 170 a los 190ml obteniendo así las lecturas para cada caso³⁶

Tabla 14. Valores ensayo consistencia normal, NTC 110.

PROPIEDAD	UNIDADES	Prueba		
		1	2	3
Vol Agua	ml	170	180	190
Peso Agua	g	170	180	190
Peso cemento	g	650	650	650
Li	mm	0	0	0
Lf	mm	4	9	14

Fuente: Propia.

Para obtener el valor de la consistencia ideal en el cemento, fue necesario realizar una gráfica lineal entre la relación agua/cemento (a/c) y la penetración (mm) obtenida con el aparato de Vicat, el cálculo de porcentaje de humedad se calcula con la siguiente ecuación:

$$\% \left(\frac{a}{c} \right) = \frac{\text{Peso del agua (g)}}{\text{Peso del cemento (g)}} * 100$$

Tabla 15. Penetración (diferencial Lf – Li) y relación a/c.

PENETRACION	PORCENTAJE
mm	%
4	26.154
9	27.692
14	29.231

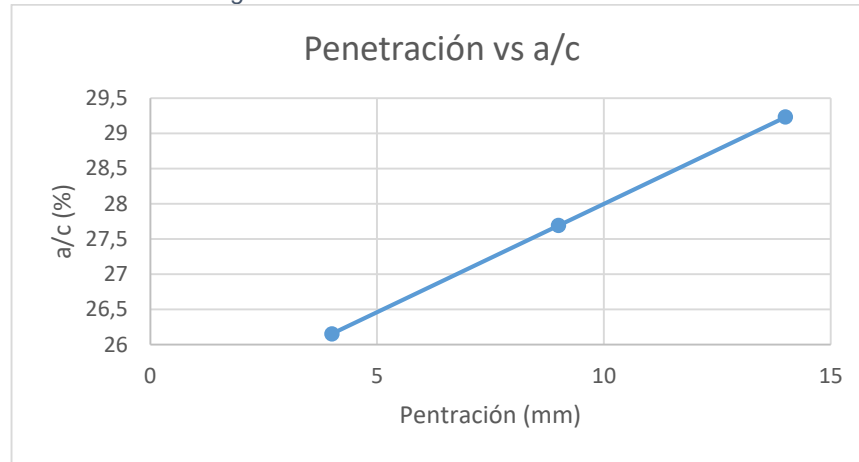
Fuente: Propia.

De acuerdo con los valores obtenidos, se obtuvo la gráfica, representada a continuación:

³⁶Técnicas, I.-I. C. de N. NORMA TÉCNICA NTC COLOMBIANA 110 INGENIERÍA CIVIL Y ARQUITECTURA. CEMENTOS. MÉTODO PARA DETERMINAR LA CONSISTENCIA NORMAL DEL CEMENTO HIDRÁULICO.



Figura 29. Gráfica lineal Penetración vs a/c.



Fuente: Propia.

La NTC 110, establece una consistencia normal para el cemento cuando el aparato de Vicat penetra la mezcla de cemento 10mm \pm 1mm durante 30s, para obtener este valor, se realiza una interpolación con los valores obtenidos en la tabla 16, de la siguiente manera:

$$Y_x = Y_o + \frac{X - X_o}{X_1 - X_o} * (Y_1 - Y_o)$$

Tabla 16. Datos para interpolación lineal a los 10mm de penetración, según NTC 110.

Expresión	Unidades	Valor
X	mm	10
Xo	mm	9
X1	mm	14
Yo	%	27.6923077
Y1	%	29.2307692

Fuente: Propia.

$$Y_x = (27.692) + \frac{10 - 9}{14 - 9} * (29.231 - 27.692)$$

$$Y_x \approx 28 \text{ mm}$$

Tiempos de fraguado

El fraguado es conocido como el periodo de tiempo en el que la pasta de cemento pasa de su estado plástico a su estado rígido sin poder ser sometido a ningún tipo de esfuerzo, podría decirse que es el fenómeno que precede el endurecimiento del material, de acuerdo a esto, se puede realizar la determinación de esta propiedad mediante diferentes normas, en nuestro caso, se utilizó la NTC 118³⁷ para el desarrollo del ensayo, en este se obtuvieron los valores de penetración reflejados en la Tabla 17, durante un periodo de tiempo de 235min.

Tabla 17. Datos obtenidos de penetración cada tiempo determinad, durante 235min.

Tiempo min	Penetración mm	Tiempo min	Penetración mm
0	40	155	21.5
30	40	165	19.5
60	40	175	16
90	40	185	16
105	40	195	1
115	39	205	7
125	32	215	4.5
135	30	225	1.5
145	29.5	235	0

Fuente: Propia.

En la tabla se puede observar que la aguja de Vicat, penetra en su totalidad la pasta introducida dentro del molde hasta pasados los 105 min de empezar el ensayo donde a los 115min ya se empieza a notar un cambio en el estado físico del material debido a la disminución que presenta la penetración, de acuerdo a los parámetros establecidos por la norma, el tiempo de fraguado se calcula de acuerdo a los tiempos en los que la aguja penetra 25mm o menos de la muestra de ensayo, esos valores están reflejados en la tabla 18, al igual que el cálculo del mismo:

$$\text{Tiempo de fraguado} = \left(\left(\frac{(H - E)}{(C - D)} \right) * (C - 25) \right) + E$$

³⁷ Técnicas, I.-I. C. de N. NTC 118 Método para determinar el tiempo de fraguado del cemento hidráulico mediante aparato de Vicat. Norma Tec. Colomb. 5 (1998)

Donde:

E: Tiempo en minutos de la última penetración superior a 25mm

H: Tiempo en minutos de la primera penetración inferior a 25mm

C: Lectura de penetración en el tiempo E

D: Lectura de penetración en el tiempo H

Tabla 18. Valores cálculo tiempo de fraguado.

ABREVIATURA	VALOR
E	145
H	155
C	29.5
D	21.5

Fuente: Propia.

$$\text{Tiempo de fraguado} = \left(\left(\frac{(155 - 145)}{(29.5 - 21.5)} \right) * (29.5 - 25) \right) + 145$$

$$\text{Tiempo de fraguado} = 150.625 \text{ min}$$

2.3. DIOXIDO DE TITANIO (TiO₂)

Para la caracterización del dióxido de titanio (TiO₂), se realizó el ensayo de densidad por medio del frasco de Le Chatelier (NTC 221)³⁵, en el cual se realiza el mismo procedimiento que para el cemento variando que el líquido con el que se mezcla el material es agua. De acuerdo con esto se obtiene el volumen desplazado y con la masa inicial se obtiene la densidad del material (*Tabla 19*). Por otra parte, se realizan los ensayos de solubilidad (NTC 5120)³⁸ y “New Test Method for

³⁵Técnicas, I.-I. C. de N. NTC 221 Método de ensayo para determinar la densidad del cemento hidráulico. 1–8 (2011).

³⁸ Técnicas, I.-I. C. de N. NTC 5120: MÉTODO DE ENSAYO PARA SOLUBILIDAD DE MATERIALES ASFÁLTICOS EN TRICLOROETILENO. (2010).

Standard test method for pigment loss on ignition" (ASTM WK46877)³⁹ , para obtener las pérdidas por secado e ignición respectivamente, esto con el fin de tener un patrón en las propiedades de calidad del material. Los resultados obtenidos se reflejan a continuación en la Tabla 19.

Tabla 19. Valores obtenidos, caracterización TiO₂

PROPIEDAD	UNIDADES	VALOR
Densidad	g/cm ³	4.18
Perdida por secado	%	0.28
Perdida por ignición	%	0.48

Fuente: Propia.

³⁹ ASTM. New Test Method for Standard test method for pigment loss on ignition. (2014).

3. DISEÑO DE MEZCLA

El mortero es uno de los materiales más usados en el sector de la construcción, no solo en Colombia sino en el mundo en general, es por esta razón que cada vez más se buscan nuevos modelos y procedimientos técnicos de diseño para brindar la mejor calidad de esta mezcla cementante. En Colombia este material es muy utilizado en la mampostería estructural, aunque también se emplea continuamente como revoque, relleno y pega en mampostería¹¹


De acuerdo con diferentes estudios, el mortero se ha fraccionado en diferentes tipos, de acuerdo con su uso, comportamiento y composición; En la Tabla 20, se puede observar la clasificación de los distintos tipos de mortero.

Tabla 20. Clasificación tipos de mortero según su sistema de producción y composición.

TIPOLOGIA		DENOMINACIÓN		
COMPOSICIÓN	MORTEROS CALCAREOS Y DE YESO			
	MORTEROS DE CAL Y CEMENTO	MORTEROS DE MAMPOSTERIA	TIPO M	
			TIPO S	
			TIPO N	
			TIPO O	
		MORTEROS DE RELLENO	TIPO PM	
TIPO PL				
SISTEMA DE PRODUCCIÓN	MEZCLADO EN OBRA	DOSIFICADO POR SILOS		
		DOSIFICADO EN CAMIONES DE BACHADA VOLUMÉTRICA		
	MORTEROS PREMEZCLADOS O PREDOSIFICADOS			

Fuente: *El Concreto y Otros Materiales Para la Construcción*, Gutiérrez 2003.

¹¹ Gutierrez de Lopez, L. EL CONCRETO Y OTROS MATERIALES PARA LA CONSTRUCCIÓN. Journal of Chemical Information and Modeling 1, (2003).

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	EFFECTO DE LA ADICIÓN DE DIÓXIDO DE TITANIO EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS Y DE DURABILIDAD EN MATERIALES A BASE DE CEMENTO	FECHA: 2020 VERSIÓN 0
--	---	--------------------------

Para el caso específico de estudio en este proyecto en el cual se desean analizar puntualmente propiedades mecánicas y de durabilidad del mortero, se escoge un mortero de cemento el cual nos brinde valores significativos de resistencia y se puedan variar sus condiciones de trabajabilidad. Para esto se ha realizado un diseño de mezcla que como menciona Libia Gutiérrez De López, en su libro “Concreto y otros materiales para la construcción”¹¹, se sugieren proporciones de cemento – agregado de 1:1 a 1:3 para morteros con altas resistencias y relaciones de A/C entre 0.45 a 0.5 para resistencias superiores a 300 Kg/cm², todo esto de acuerdo a investigaciones realizadas por el ingeniero Rodrigo Salamanca de La Universidad Nacional De Colombia⁴⁰, vale aclarar que estos valores varían con respecto a la literatura consultada pero se maneja un rango similar para el diseño de estos tipos de mortero. Finalmente, después de un extensa y continua revisión de la literatura se asume una proporción de Cemento – Agregado de 1:2.75 como lo sugiere la norma (NTC 3329)⁴¹ y una relación A/C de 0.48, el cual nos garantice una trabajabilidad y altas resistencias, la masa total utilizada para la mezcla del mortero fue de 17.61 Kg, a partir de esta se calculan los valores de las proporciones iniciales y los porcentajes de TiO₂ por utilizar.

Finalmente, se manejaron 4 muestras de las cuales 3 van a contar con variaciones en el porcentaje de TiO₂ adicionado, estos porcentajes se obtienen de manera arbitraria con un fundamento establecido desde la literatura consultada. Los porcentajes de TiO₂ se darán con respecto a la masa total de cemento utilizada en la muestra, además, se utilizará un cuarto diseño patrón referente a una mezcla convencional de mortero para así poder reflejar la variación o diferencia misma del comportamiento de dicha mezcla patrón y las mezclas con presencia de TiO₂ dentro de su matriz, finalmente, los porcentajes decididos para este estudio fueron de 1%, 2% y 3%, su diseño de mezcla se muestra a continuación en las siguientes tablas.

¹¹ Gutierrez de Lopez, L. EL CONCRETO Y OTROS MATERIALES PARA LA CONSTRUCCIÓN. Journal of Chemical Information and Modeling 1, (2003).

⁴⁰ Salamanca, R. Dosificación de morteros. Ing. e Investig. 0, 17–23 (2010).

⁴¹ Técnicas, I.-I. C. de N. Ntc 3329 Especificaciones Del Mortero Para Unidades De Mampostería. 28 (2004).

Tabla 21. Diseños de mezcla para cada muestra de mortero con su respectivo porcentaje de TiO_2 (0%, 1%, 2%, 3%)

0% TiO_2	
Material	Peso (kg)
Cemento	4,16
Agua	2,02
Arena	11,43
TiO_2	0,00

2% TiO_2	
Material	Peso (kg)
Cemento	4,16
Agua	2,02
Arena	11,43
TiO_2	0,083

1% TiO_2	
Material	Peso (kg)
Cemento	4,16
Agua	2,02
Arena	11,43
TiO_2	0,042

3% TiO_2	
Material	Peso (kg)
Cemento	4,16
Agua	2,02
Arena	11,43
TiO_2	0,125

Fuente: Propia.

4. CARACTERIZACIÓN MUESTRAS DE MORTERO

4.1. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

Mediante la Norma NTC 220 se procedió a realizar pruebas de resistencia a la compresión a probetas de mortero (5 mm x 5 mm) con dosificaciones de 0%, 1%, 2% y 3% de TiO₂. Este ensayo se realizó para 7 y 28 días de curado⁴².

Procedimiento:

1. Se prepara una mezcla de mortero para cada porcentaje de TiO₂ y se funde en 2 capas de 32 golpes, este proceso en 6 formaletas de 5 cm x 5 cm para evaluar 3 cubos a 7 días de curado y los otros 3 cubos a 28 días de curado para cada porcentaje de TiO₂.
2. Ya fundidos los 24 cubos, se dejan en un cuarto húmedo durante aproximadamente 14 horas con las caras superiores expuestas al aire libre.
3. Se ponen a curar 3 cubos de cada porcentaje de TiO₂ a 7 días y los otros 3 cubos restantes a 28 días.
4. Cumplidos los días de curados, se desmoldan los cubos y se procede a someter a resistencia a la compresión cada uno de los cubos, estos son ubicados en la maquina universal donde las superficies que se van a someter a la presión son las que estuvieron en contacto directo con la formaleta.

RESULTADOS DE LA PRUEBA

Una vez registrados las cargas máximas tomadas de la maquina universal en el momento de rotura y se procede a calcular la resistencia a la compresión con la siguiente ecuación:

$$f_m = \frac{P}{A}$$

Donde:

f_m : Resistencia a la compresión [MPa]

P : Carga máxima total [N]

A : Área de la superficie cargada [mm²]

⁴² Técnicas, I.-I. C. de N. NTC 220: DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA DE MORTEROS DE CEMENTO HIDRÁULICO USANDO CUBOS DE 50 mm ó 50,8 mm DE LADO. J. Chem. Inf. Model. 53, 287 (2008).

De acuerdo con la de resistencia a compresión se calcula el resultado en Mpa para cada una de las dosificaciones de TiO_2 :

En la Tabla 22 se detallan los resultados obtenidos de la resistencia a la compresión para un porcentaje de 0% de TiO_2 .

Tabla 22. Valores resistencia a la compresión a para mortero con 0% TiO_2 .

0% TiO_2						
Muestra	7 días			28 días		
	Carga Máxima		Resistencia a la Compresión	Carga Máxima		Resistencia a la Compresión
	Kg	N	MPa	Kg	N	MPa
1	445	4361	1.74	687	6732.6	2.69
2	462	4527.6	1.81	708	6938.4	2.78
3	443	4341.4	1.74	676	6624.8	2.65

Fuente: Propia.

En la Tabla 23 se evidencia la desviación estándar con 0% de TiO_2 .

Tabla 23. Valores desviación estándar en resistencia a la compresión para mortero con 0% TiO_2 .

DESVIACIÓN ESTÁNDAR EN 0% DE TiO_2						
			7 DÍAS		28 DÍAS	
n			3		3	
MEDIA			1.764		2.706	
VARIANZA			-0.020	0.047	-0.027	-0.013
			0.000	0.002	0.001	0.069
			0.003		0.008	
			0.002		0.004	
DESVIACIÓN ESTÁNDAR			0.041		0.064	

Fuente: Propia.

En la Tabla 24 se detallan los resultados obtenidos de la resistencia a la compresión para un porcentaje de 1% de TiO_2 .

Tabla 24. Valores resistencia a la compresión para mortero con 1% TiO_2 .

1% TiO_2						
Muestra	7 días			28 días		
	Carga Máxima		Resistencia a la Compresión	Carga Máxima		Resistencia a la Compresión
	Kg	N	MPa	Kg	N	MPa
1	452	4429.6	1.77	721	7065.8	2.83
2	468	4586.4	1.83	736	7212.8	2.89
3	441	4321.8	1.73	718	7036.4	2.81

Fuente: Propia.

En la Tabla 25 se evidencia la desviación estándar con 1% de TiO_2 .

Tabla 25. Valores desviación estándar en resistencia a la compresión para mortero con 1% TiO_2 .

DESVIACION ESTÁNDAR EN 1% DE TiO_2						
			7 DÍAS		28 DÍAS	
n			3		3	
MEDIA			1.778		2.842	
VARIANZA			-0.007	0.056	-0.050	-0.016
			0.000	0.003	0.002	0.043
			0.006		0.003	
			0.003		0.001	
DESVIACIÓN ESTÁNDAR			0.053		0.038	

Fuente: Propia.

En la Tabla 26 se detallan los resultados obtenidos de la resistencia a la compresión para un porcentaje de 2% de TiO_2 .

Tabla 26. Valores resistencia a la compresión para mortero con 2% TiO_2 .

2% TiO_2						
Muestra	7 días			28 días		
	Carga Máxima		Resistencia a la Compresión	Carga Máxima		Resistencia a la Compresión
	Kg	N	MPa	Kg	N	MPa
1	482	4723.6	1.89	764	7487.2	2.99
2	497	4870.6	1.95	758	7428.4	2.97
3	471	4615.8	1.85	779	7634.2	3.05

Fuente: Propia.

En la Tabla 27 se evidencia la desviación estándar con 2% de TiO_2 .

Tabla 27. Valores desviación estándar en resistencia a la compresión para mortero con 2% TiO_2 .

DESVIACION ESTANDAR EN 2% DE TiO_2						
			7 DÍAS		28 DÍAS	
n			3		3	
MEDIA			1.895		3.007	
VARIANZA			-0.005	0.054	-0.012	-0.035
			0.000	0.003	0.000	0.001
			0.005		0.004	
			0.003		0.002	
DESVIACIÓN ESTÁNDAR			0.051		0.042	

Fuente: Propia.

En la siguiente Tabla 28 se detallan los resultados obtenidos de la resistencia a la compresión para un porcentaje de 3% de TiO_2 .

Tabla 28. Valores resistencia a la compresión para mortero con 3% TiO_2 .

3% TiO_2						
Muestra	7 días			28 días		
	Carga Máxima		Resistencia a la Compresión	Carga Máxima		Resistencia a la Compresión
	Kg	N	MPa	Kg	N	MPa
1	481	4713.8	1.89	739	7242.2	2.90
2	469	4596.2	1.84	747	7320.6	2.93
3	472	4625.6	1.85	741	7261.8	2.90

Fuente: Propia.

En la siguiente Tabla 29 se evidencia la desviación estándar con 3% de TiO_2 .

Tabla 29. Valores desviación estándar en resistencia a la compresión para mortero con 3% TiO_2 .

DESVIACION ESTANDAR						
		7 DÍAS			28 DÍAS	
n		3			3	
MEDIA		1.858			2.910	
VARIANZA		0.027	-0.020	-0.008	-0.013	0.018
		0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
		0.001			0.001	
		0.001			0.000	
DESVIACIÓN ESTÁNDAR		0.024			0.016	

Fuente: Propia.

Por medio de los resultados obtenidos se construye una gráfica Figura 31 donde se ve muestra la tendencia de la resistencia a la compresión según el porcentaje de TiO_2 a 7 y 28 días de curado.

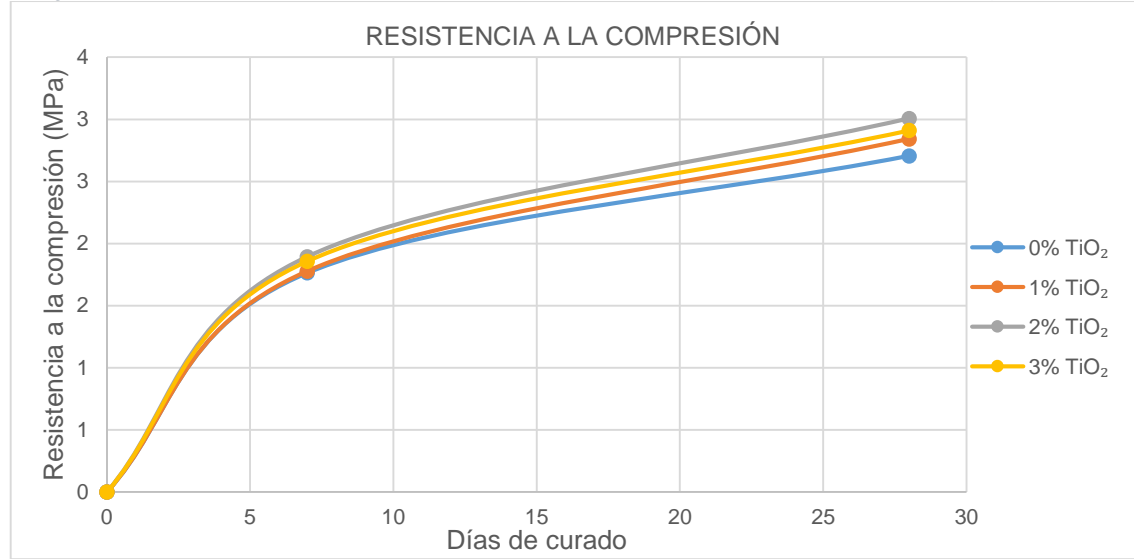
Tabla 30. Promedio de valores para resistencia a la compresión en cada muestra con porcentajes de TiO_2 .

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN [MPa]				
DÍAS	0% TiO_2	1% TiO_2	2% TiO_2	3% TiO_2
0	0	0	0	0
7	1.76	1.78	1.89	1.86
28	2.71	2.84	3.01	2.91

Fuente: Propia.



Figura 30. Gráfica de la tendencia de resistencia a la compresión en mortero con porcentajes de TiO_2 .



Fuente: Propia.

En la anterior grafica se refleja el comportamiento para la muestra de 0% de TiO_2) (muestra control) donde en los 7 días alcanza una resistencia a la compresión de 1.76 Mpa y a los 28 días de 2.71 MPa. La resistencia a la compresión en 7 días para el porcentaje de 1% de TiO_2 es de 1.78 MPa donde no varía respecto al 0% de TiO_2 y a los 28 días aumenta considerablemente a 2.84 MPa. En el caso de 2% de TiO_2 según la gráfica es donde se presencia la mayor resistencia a la compresión tanto para 7 días con 1.89 MPa y 28 días con 3.01 MPa. Con 3% de TiO_2 este tiene una resistencia a la compresión menor respecto a la anterior en 7 días con 1.86 Mpa y 28 días con 2.91 Mpa.

Figura 31. Ensayo resistencia a compresión.



Fuente: Propia.

4.2. PENETRACIÓN DE CLORUROS

De acuerdo con la norma NT BUILD 492 se realizó la lectura del coeficiente de migración de cloruro, donde es medida la resistencia a la penetración de cloruro del mortero con diferentes adiciones de TiO_2 . Las probetas usadas fueron cilindros de mortero con diferentes porcentajes de TiO_2 con un diámetro de 100 mm x 200 mm, donde se emplearon 3 probetas para cada porcentaje de TiO_2 ⁴³.

Procedimiento:

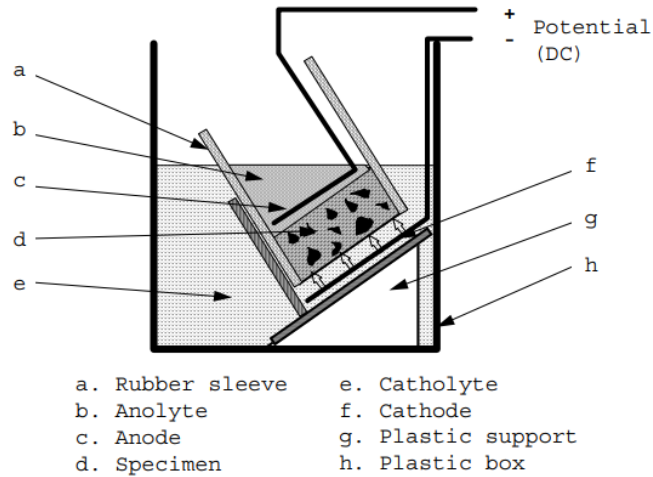
Preparación de la prueba:

1. Las probetas cilíndricas de diámetro de 100 mm x 200 mm de espesor, estas son cortadas por la mitad quedando dos partes de 100 mm x 100 mm y luego se corta una rodaja por la mitad obteniendo una probeta de 100 mm x 50 mm.
2. Se toman las muestras más cercanas a la del primer corte, es decir hacia la superficie central, ya que ésta es expuesta a la solución de cloruro (catolito).
3. Se limpia las probetas cilíndricas de excesos de agua o rebabas en su superficie hasta que éstas queden totalmente secas.
4. Se extraen los vacíos de aire en las muestras y luego se colocan en el recipiente, donde este es llenado con solución saturada de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ hasta sumergir completamente las muestras, estas muestras se dejan durante 18 horas en la solución.
5. Para proceder a la prueba se llena un depósito de catolito con aproximadamente 12 litros de solución de cloruro de sodio (NaCl) al 10%, y se coloca en la base de este depósito un soporte de plástico
6. Se coloca una funda de goma alrededor de la superficie curva de las muestras con dos abrazaderas, se rectifica que no haya defectos.
7. Se sumerge el cátodo (placa de acero inoxidable) sobre el soporte de plástico en el depósito de catolito.
8. Se coloca la muestra sobre el soporte de plástico en el depósito de catolito.
9. Se añade 300 ml de solución de anolito, es decir hidróxido de sodio (NaOH 0.3 M) en la manga restante.
10. Se sumerge el ánodo (la malla de acero inoxidable) en la solución de anolito (dentro de la funda de plástico)

⁴³NT Build 492. Concrete, mortar and cement-based repair materials: Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments. Measurement 1–8 (1999).

11. Se conecta el ánodo al polo positivo y el cátodo al polo negativo de la fuente de alimentación.

Figura 32. Gráfica ilustrativa proceso y fenómeno para la penetración de cloruros en materiales a base de cemento.



Fuente: NT BUILD 492.

Lectura de migración:

1. Se enciende la fuente de alimentación, con un voltaje de 30 V, se toma registro de la corriente inicial para cada una de las muestras.
2. Se toma registro de la temperatura inicial para cada solución de anólito.
3. Se elige una duración de prueba que sea adecuada de acuerdo con la corriente inicial, según la Tabla 1 de la Norma NT BUILD 492.
4. Se registra la corriente y temperatura final antes de terminar la lectura.

RESULTADOS DE LA PRUEBA

Con la siguiente ecuación se determinó D_{nssm} (coeficiente de migración en estado no estacionario) [m²/s].

$$D_{nssm} = \frac{0.00239(273 + T)L}{(U - 2)t} * \left(Xd - 0.0238 \sqrt{\frac{(273 + T)LXd}{U - 2}} \right)$$

Donde:

D_{nssm} : coeficiente de migración en estado no estacionario, [$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$]

U : valor absoluto de la tensión aplicada, [V]

T : valor medido de las temperaturas inicial y final en la solución de anolito, [$^{\circ}\text{C}$]

L : espesor de la muestra, [mm]

x_d : valor promedio de las profundidades de penetración, [mm]

t : duración de la prueba, [hora]

Conforme a lo anterior se obtuvieron los siguientes resultados:

Para porcentaje de 0% de TiO_2 :

Tabla 31. Valores obtenidos D_{nssm} (Coeficiente de migración en estado no estacionario) para mezcla de mortero con 0% TiO_2

PRUEBA 1			PRUEBA 2			PRUEBA 3		
Muestra	Patrón 0% TiO_2		Muestra	Patrón 0% TiO_2		Muestra	Patrón 0% TiO_2	
T	21	$^{\circ}\text{C}$	T	21	$^{\circ}\text{C}$	T	21	$^{\circ}\text{C}$
L	50	mm	L	51	mm	L	50	mm
U	30	V	U	30	V	U	30	V
t	24	hr	t	24	hr	t	24	hr
x_d	28.65	mm	x_d	27.90	mm	x_d	26.75	mm
D_{nssm}	13.45	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	D_{nssm}	13.33	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	D_{nssm}	12.51	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$

Fuente: Propia.

Para porcentaje de 1% de TiO_2 :

Tabla 32. Valores obtenidos D_{nssm} (Coeficiente de migración en estado no estacionario) para mezcla de mortero con 1% TiO_2 .

PRUEBA 1			PRUEBA 2			PRUEBA 3		
Muestra	1% TiO_2		Muestra	1% TiO_2		Muestra	1% TiO_2	
T	21	$^{\circ}\text{C}$	T	21	$^{\circ}\text{C}$	T	21	$^{\circ}\text{C}$
L	50	mm	L	50	mm	L	50	mm
U	30	V	U	30	V	U	30	V
t	24	hr	t	24	hr	t	24	hr
x_d	30.55	mm	x_d	30.70	mm	x_d	31.20	mm
D_{nssm}	14.40	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	D_{nssm}	14.47	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	D_{nssm}	14.72	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$

Fuente: Propia.

Para porcentaje de 2% de TiO_2 :

Tabla 33. Valores obtenidos D_{nssm} (Coeficiente de migración en estado no estacionario) para mezcla de mortero con 2% TiO_2 .

PRUEBA 1			PRUEBA 2			PRUEBA 3		
Muestra	2% TiO_2		Muestra	2% TiO_2		Muestra	2% TiO_2	
T	21	°C	T	21	°C	T	21	°C
L	50	mm	L	50	mm	L	50	mm
U	30	V	U	30	V	U	30	V
t	24	hr	t	24	hr	t	24	hr
x_d	31.85	mm	x_d	32.55	mm	x_d	32	mm
D_{nssm}	15.04	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	D_{nssm}	15.39	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	D_{nssm}	14.92	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$

Fuente: Propia.

Para porcentaje de 3% de TiO_2 :

Tabla 34. Valores obtenidos D_{nssm} (Coeficiente de migración en estado no estacionario) para mezcla de mortero con 3% TiO_2 .

PRUEBA 1			PRUEBA 2			PRUEBA 3		
Muestra	3% TiO_2		Muestra	3% TiO_2		Muestra	3% TiO_2	
T	21	°C	T	21	°C	T	21	°C
L	50	mm	L	51	mm	L	50	mm
U	30	V	U	30	V	U	30	V
t	24	hr	t	24	hr	t	24	hr
x_d	33.45	mm	x_d	33.90	mm	x_d	33.80	mm
D_{nssm}	15.84	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	D_{nssm}	16.37	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	D_{nssm}	16.01	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$

Fuente: Propia.

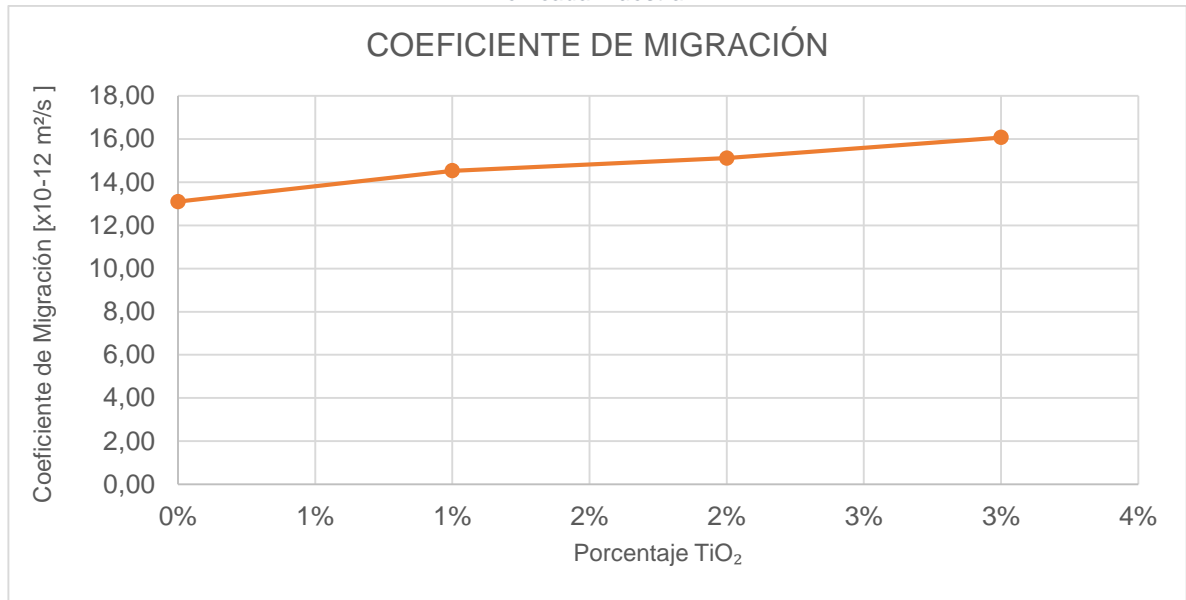
Con los datos obtenidos al calcular el coeficiente de migración, se establece la siguiente gráfica Figura 35, donde se puede ver esta lectura para cada uno de los porcentajes de TiO_2 :

Tabla 35. Promedio de valores obtenidos D_{nssm} (Coeficiente de migración en estado no estacionario) para mezcla de mortero con diferentes porcentajes de TiO_2 .

Porcentaje TiO_2	D_{nssm}	
0%	13.10	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$
1%	14.53	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$
2%	15.12	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$
3%	16.07	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$

Fuente: Propia.

Figura 33. Gráfico ilustrativo de la tendencia entre el coeficiente de migración (D_{nss}) vs el contenido de TiO_2 en cada muestra.



Fuente: Propia.

Conforme con la anterior gráfica se puede ver el comportamiento del coeficiente de migración, lo cual se refiere a la penetración de iones bajo la acción de un campo eléctrico externo. En la muestra de 0% de TiO_2 este coeficiente fue de $13,10 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, pero con la dosificación de 1% de TiO_2 este va en aumento con $14,53 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, en un 2% de TiO_2 también aumenta con $15,12 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ y en el caso de 3% de TiO_2 se ve el punto más alto con $16,07 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$.

Figura 34. Ensayo de resistencia a cloruros.



Fuente: Propia.



Figura 35. Probeta ensayada a resistencia a cloruros.

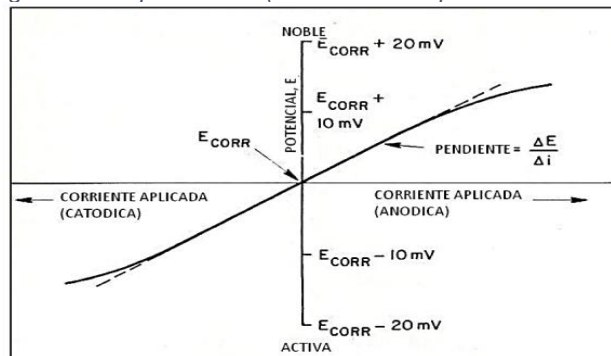


Fuente: Propia.

4.3. RESISTENCIA A LA POLARIZACIÓN LINEAL (RPL)

El monitoreo de la corrosión en tiempo real es una aplicación común para conocer el funcionamiento de las estructuras reforzadas. Para esto existe el ensayo de resistencia a la polarización lineal. Este es un método utilizado para determinar los procesos corrosivos que pueda presentar un material metálico. Esta metodología se diferencia de otros ensayos relacionados con la tasa de corrosión en que esta determina resultados números, rápidos y precisos para calificar el fenómeno de la velocidad de corrosión que sufre el material⁴⁴.

Figura 36. Esquema RPL (resistencia a la polarización lineal).



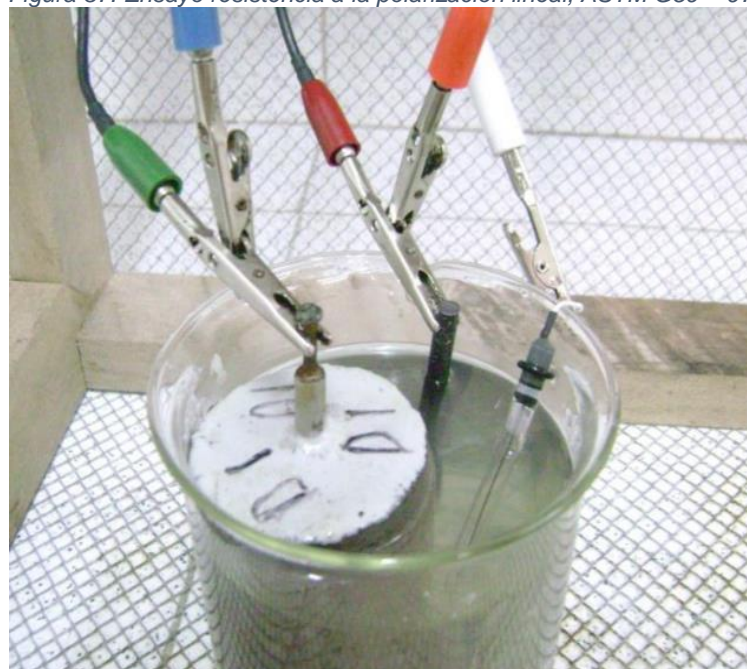
Fuente:

⁴⁴ Laura, A. et al. Velocidad de corrosión en el sistema acero-concreto: enfoque al método de curado. CULCyT 0, (2016).



La norma que describe el ensayo corresponde a la ASTM G59 – 97 “*Standard Test Method for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements*”⁴⁵ en la cual se establece el procedimiento y la obtención de cálculos por medio de una prueba de software la cual incluye un diagrama de cableado esquemático entre un potencióstato, monitor y cilindros reforzados de 50mm x 100mm como se muestra en la *Figura 34*, continuo a esto se procede a ensayar primeramente el sistema de adquisición de datos para garantizar un correcto funcionamiento. Se realiza un ajuste de potencial en el potencióstato entre un rango de ± 30 mV (*Figura 34*) y se aplica el potencial. La corriente aplicada de acuerdo con la norma debe ser de 3 mA, cumpliendo con la ley de Ohm, $I = E/R$. Finalmente, se registra la curva de polarización a una velocidad de 0.6 V/h, esta debe ser lineal, pasar por el origen y tener una pendiente de 10Ω y los valores registrados en los escaneos para el rango determinado (± 30 mV), deben ser los mismos⁴⁶.

Figura 37. Ensayo resistencia a la polarización lineal, ASTM G59 – 97.



Fuente: Propia.

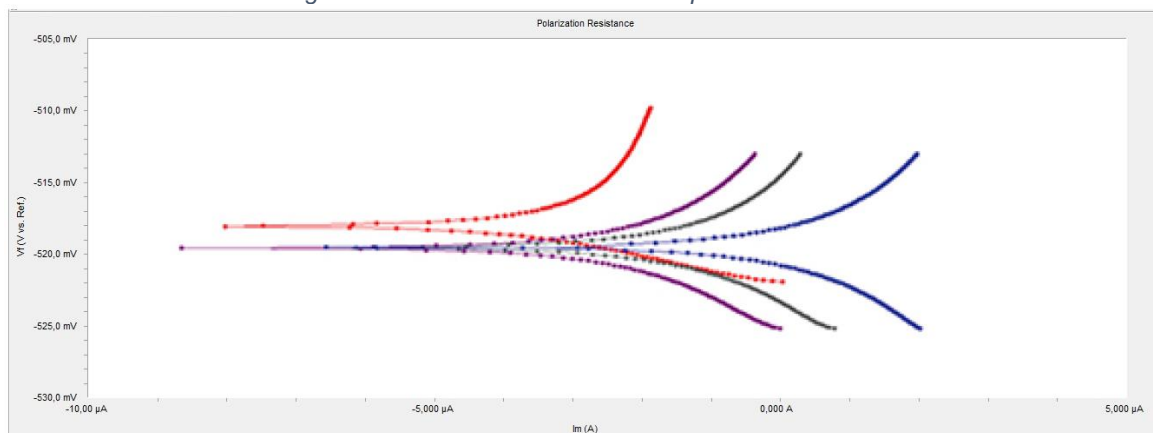
⁴⁵ ASTM International. ASTM G59 - Standard test method for conducting potentiodynamic polarization resistance measurements. ASTM Stand. 97, 1–4 (2014).

⁴⁶Rodríguez, F. Técnicas electroquímicas de corriente directa para la medición de la velocidad de corrosión ‘Resistencia a la polarización’. 303, 1–9 (2012).



RESULTADOS

Figura 38. Resultados obtenidos RPL por curvas de Tafel.



Fuente: Propia.

Con los resultados obtenidos para cada muestra Figura 36, se obtuvieron los siguientes valores de corriente de corrosión (i_{corr}) y Resistencia a la polarización lineal (RPL), el valor del coeficiente de Stern Greary (B), el cual se encuentra entre un rango de 26 mV – 52 mV, se asume de 26 mV.


Tabla 36. Valores RPL para cada porcentaje de TiO_2 .

Contenido de TiO_2 (%)	B (mV)	RPL ($\Omega \cdot cm^2$)
0	26	3,94
1	26	3,47
2	26	3,10
3	26	2,83

Fuente: Propia.

Con estos valores se procede entonces a calcular la densidad de corrosión de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$i_{corr} = 10^6 * \frac{B}{Rp}$$

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	EFFECTO DE LA ADICIÓN DE DIÓXIDO DE TITANIO EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS Y DE DURABILIDAD EN MATERIALES A BASE DE CEMENTO	FECHA: 2020 VERSIÓN 0
---	---	--------------------------

Donde:

i_{corr} = Densidad de corriente corrosión $\left(\frac{\mu A}{cm^2}\right)$

B = Coeficiente de Stern Greary (mV)

R_p = Resistencia a la polarización lineal $\left(\frac{g}{cm^3}\right)$

- Muestra patrón

$$i_{corr} = 10^6 * \frac{26}{3.94}$$

$$i_{corr} = 6.6 \frac{\mu A}{cm^2}$$

- Mezcla + 1% TiO2

$$i_{corr} = 10^6 * \frac{26}{3.47}$$

$$i_{corr} = 7.5 \frac{\mu A}{cm^2}$$

- Mezcla + 2% TiO2

$$i_{corr} = 10^6 * \frac{26}{3.10}$$

$$i_{corr} = 8.4 \frac{\mu A}{cm^2}$$

- Mezcla + 3% TiO2

$$i_{corr} = 10^6 * \frac{26}{2.83}$$

$$i_{corr} = 9.2 \frac{\mu A}{cm^2}$$

Continuamente se procede a calcular la velocidad de corrosión con la ecuación correspondiente, a continuación, se muestra el resumen de los valores obtenido en la *Tabla 37*.

$$V_{corr} = 0.129 * \frac{PE}{D} * i_{corr}$$

Donde:

V_{corr} = Velocidad de corrosión (mpy)

PE = Peso equivalente del especimen corrosivo (g)

D = Densidad del material corrosivo $\left(\frac{g}{cm^3}\right)$

i_{corr} = Densidad de corrosión $\left(\frac{\mu A}{cm^2}\right)$

Tabla 37. Valores finales RPL, i_{corr} y V_{corr} para cada porcentaje de TiO_2 .

Contenido de TiO_2 (%)	i_{corr} ($\mu A/cm^2$)	B (mV)	RPL ($\Omega.cm^2$)	V_{corr} (mpy)
0	6,6	26	3,94	0,851
1	7,5	26	3,47	0,968
2	8,4	26	3,10	1,084
3	9,2	26	2,83	1,187

Fuente: Propia.

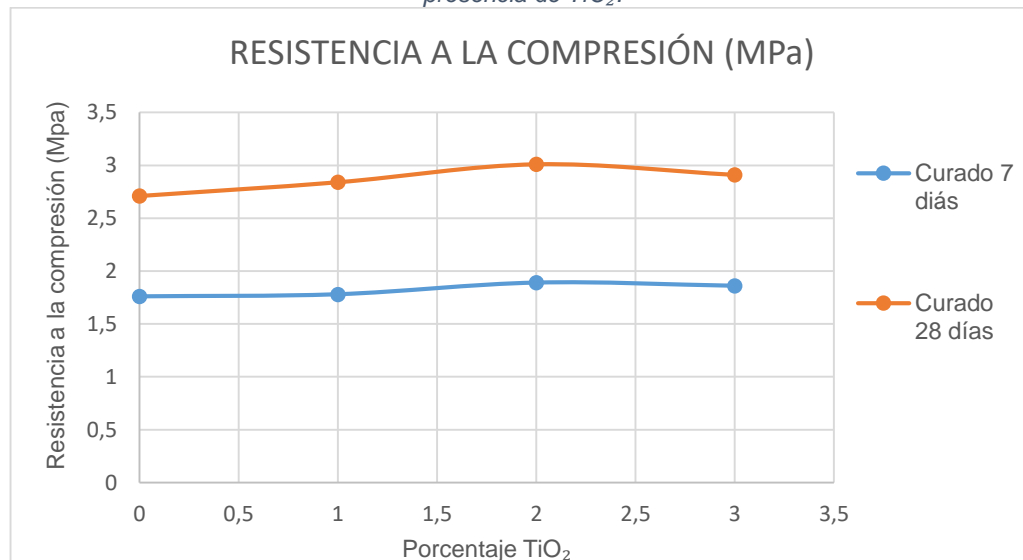
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

La implementación del Dióxido de Titanio en muestra de mortero, en esta investigación es muy importante, ya que al ser un material fotocatalítico con propiedades de autolimpieza y depuradoras del aire, puede tener una gran influencia en las propiedades mecánicas y de durabilidad en el cemento.

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

La resistencia a la compresión más alta que se obtuvo en esta investigación fue en las probetas que contenían 2% de TiO_2 con un valor de 1.89 MPa para 7 días de curado y 3.01 MPa para 28 días de curado. En el caso de 3% de TiO_2 la resistencia a la compresión disminuyó a 1.86 MPa a 7 días de curado y 2.91 MPa a 28 días de curado. (Figura 37)

Figura 39. Gráfico comparativo para 7 y 28 días de curado entre muestra patrón (0%) y muestras con presencia de TiO_2 .



Fuente: Propia.

La resistencia está influenciada por distintos factores donde la cantidad de TiO_2 es determinante. Esto se debe a que este fue empleado a granel primeramente con el cemento, luego con el agregado y agua, al tener la mezcla homogénea el TiO_2

influyó de manera restrictiva, es decir, se creó un refuerzo de gel, lo que implica un fortalecimiento en la mezcla de mortero, esto sucede porque el TiO_2 tiene un alto nivel de reactividad y además un alta área superficial de las partículas, lo cual llega a incidir directamente en la hidratación del cemento, al utilizar altas cantidades de TiO_2 llega a afectar el proceso de hidratación, porque no se permite una buena reacción del agua-cemento ya que en este caso el TiO_2 al ser mezclado con el cemento resta solubilidad al agua. En el caso de una buena relación agua-cemento la hidratación del cemento asegura una buena resistencia²⁷. Además de que el TiO_2 es considerado como un material de relleno en la mezcla influye también en la reducción de porosidad.

PENETRACIÓN DE CLORUROS

Según los resultados obtenidos de los coeficientes de migración lo cual se refiere a la medida de la resistencia del material a la penetración de cloruro. De acuerdo con la siguiente tabla se puede inferir sobre el comportamiento de este coeficiente.

Figura 40. Resistencia a la penetración de cloruros.

$\times 10^{-12}$	Concrete resistance
>15	Low
10-15	Moderate
5-10	High
2,5-5	Very high
<2,5	Ultra high

Fuente: American Journal of Engineering and Applied Sciences

De manera general los resultados del ensayo los coeficientes estuvieron dentro de un rango de $12.51 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ y $16.37 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, donde se cataloga la resistencia del mortero a la penetración de cloruros de moderada a baja.

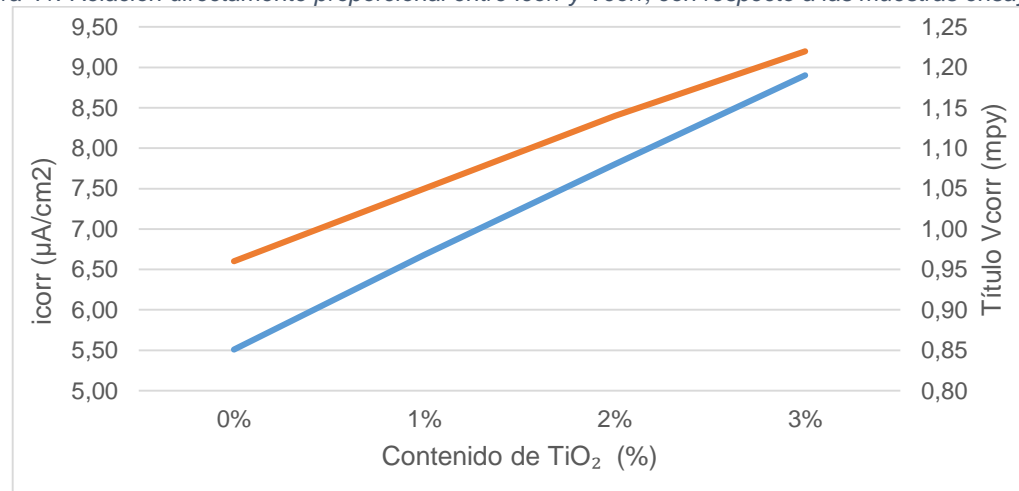
En este ensayo realizado se evidencia que a medida que se aumenta el porcentaje de TiO_2 aumenta la resistencia a la penetración, exactamente con el porcentaje de 3% TiO_2 la resistencia fue de $16.07 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, siendo la más alta de todas las realizadas. La razón por la cual sucede esto es porque el TiO_2 cumple una importante función. De acuerdo con su origen metálico este componente químico contribuye a la conductividad eléctrica dentro de la matriz del mortero para así facilitar esta reacción de penetración de iones de cloruro, para finalmente disminuir la resistencia a este ataque químico.

²⁷ Mohseni, E., Naseri, F., Amjadi, R., Khotbehsara, M. M. & Ranjbar, M. M. Microstructure and durability properties of cement mortars containing nano-TiO₂ and rice husk ash. Constr. Build. Mater. 114, 656–664 (2016).

RESISTENCIA A LA POLARIZACIÓN LINEAL

De acuerdo con los resultados obtenidos, se pudo observar que el comportamiento presentado por las mezclas de concreto con porcentajes de TiO_2 dentro de sus matrices arrojaron valores menores en lo que respecta a la resistencia a la polarización lineal, en este orden de ideas se presentaron valores más altos en la densidad de la corriente de corrosión y al ser este, directamente proporcional con el valor de la velocidad de corrosión los resultados obtenidos muestran un significativo aumento de valores en la propiedad con respecto a muestras estandarizadas, siempre se obtuvo una tendencia lineal de aumento a medida que el porcentaje del pigmento dentro de la mezcla era mayor como se puede evidenciar en la *Figura 38*.

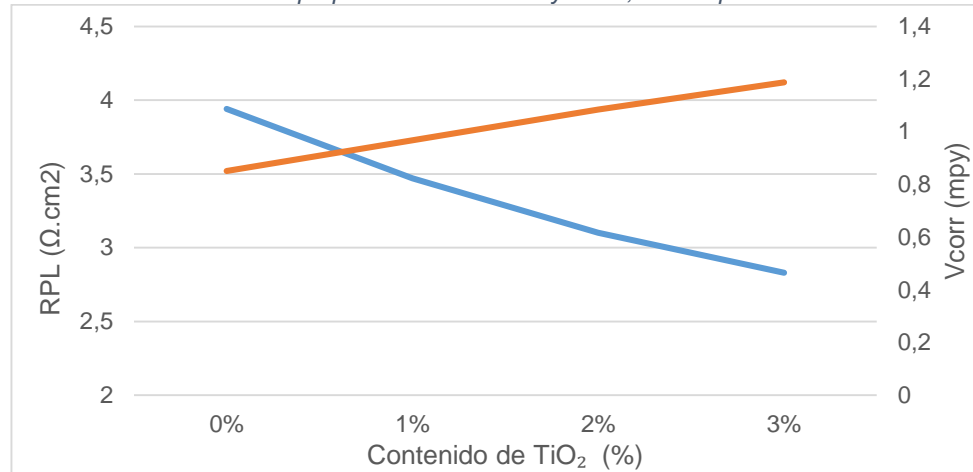
Figura 41. Relación directamente proporcional entre I_{corr} y V_{corr} , con respecto a las muestras ensayadas.



Fuente: Propia.

Por otro lado, contrario a este fenómeno, se presenta una relación inversamente proporcional para el RPL y la Velocidad de corrosión, esto debido a que el valor de la resistencia a la polarización lineal es inversamente proporcional a la densidad de corriente (I_{corr}) y al obtener una disminución lineal de esta propiedad se daba un aumento en la velocidad de corrosión. Según el método DURAR (*Figura 40*), los valores obtenidos al ser superiores de $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ se presenta en un nivel IV correspondiente a un alto grado de corrosión desde la muestra estandarizada, indicio por el cual es cuestionable la exactitud del comportamiento que puede presentar una muestra con adición de TiO_2 sobre esta propiedad de durabilidad en la mezcla del mortero.

Figura 42 . Relación inversamente proporcional entre RPL y Vcorr, con respecto a las muestras ensayadas.



Fuente: Propia.


Figura 43. Clasificación valores Icorr.

Indicador	Nivel I	Nivel II	Nivel III	Nivel IV
Profundidad de carbonatación [X_{CO_2}]	$X_{CO_2} = 0$	$X_{CO_2} < c$	$X_{CO_2} = c$	$X_{CO_2} > c$
Nivel de cloruros [X_{Cl}]	$X_{Cl} = 0$	$X_{Cl} < c$	$X_{Cl} = c$	$X_{Cl} > c$
Fisuración por corrosión en el recubrimiento [w]	Sin fisuras	Fisuras < 0.3 mm	Fisuras > 0.3 mm	Fisuración generalizada y estallidos
Resistividad (Ωm) [ρ]	> 1000	500-1000	100-500	< 100
Pérdida sección [ϕ]	< 1 %	1 - 5 %	5 - 10 %	> 10 %
Intensidad de corrosión ($\mu A/cm^2$) [I_{CORR}]	< 0.1	0.1-0.5	0.5-1	>1

Fuente: Manual del inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de concreto armado, CYTED.

De acuerdo con la literatura consultada respecto al comportamiento que presentan las muestras de mortero con presencia de TiO₂ sobre la resistencia electroquímica del acero de refuerzo se obtuvieron valores diversos con respecto a la tendencia, ya que en varios estudios se afirma que la adición de TiO₂ en distintas modalidades genera un aumento en la resistencia a la polarización (Rp) del acero de refuerzo en comparación con muestras estandarizadas, como lo menciona *Mohseni, et al*⁴⁷ . Donde morteros con adiciones de 1%, 3% y 5% de TiO₂ generan aumentos considerables en los valores obtenidos en comparación a una muestra control, en este estudio se evidencia una importante influencia en la mejora de esta propiedad

⁴⁷ Mohseni, E., Miyandehi, B. M., Yang, J. & Yazdi, M. A. Single and combined effects of nano-SiO₂, nano-Al₂O₃ and nano-TiO₂ on the mechanical, rheological and durability properties of self-compacting mortar containing fly ash. Constr. Build. Mater. 84, 331–340 (2015).

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	EFFECTO DE LA ADICIÓN DE DIÓXIDO DE TITANIO EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS Y DE DURABILIDAD EN MATERIALES A BASE DE CEMENTO	FECHA: 2020 VERSIÓN 0
--	---	--------------------------

determinada por el porcentaje de TiO_2 , ya que las variaciones entre un porcentaje y otro pueden generar una diferencia de hasta 48% del valor obtenido, determinando así la tasa de corrosión para un nivel bajo y/o moderado. Esta última consideración aplica para nuestro estudio ya que como se puede observar en la *Tabla 37* se observan reducciones de hasta el 28% entre una muestra con adición de TiO_2 y muestras estandarizadas. *Md Daniyal, et al*⁴⁸. También manifiesta una mejora en la cinética de este comportamiento para morteros con adición de TiO_2 , igual que en el caso anterior la tasa de corrosión disminuye a medida que se aumenta el porcentaje de TiO_2 con variaciones de hasta el 92.78%, confirmando una vez más que el porcentaje adicionado es fundamental en el comportamiento que tenga la mezcla de mortero respecto a esta propiedad. También en distintos estudios se considera una relación inversamente proporcional entre el porcentaje de agua de absorción de la muestra y la tasa de corrosión ya que a medida que se aumenta el porcentaje de TiO_2 ⁴⁹, al tener propiedades hidrofílicas este disminuye el porcentaje de agua necesaria para la mezcla y al estar uniformemente disperso el TiO_2 en la matriz de la mezcla este sirve también como un mecanismo de relleno para reducir la el porcentaje de porosidad y la filtración de moléculas de agua, lo cual en términos de durabilidad nos generaría un considerable reducción en la tasa de corrosión (V_{corr})⁵⁰.

⁴⁸ Daniyal, M., Akhtar, S. & Azam, A. Effect of nano-TiO2 on the properties of cementitious composites under different exposure environments. J. Mater. Res. Technol. 8, 6158–6172 (2019).

⁴⁹ Dhiflaoui, H., Khelifi, K., Barhoumi, N. & Ben Cheikh Larbi, A. Effect of voltage on microstructure and its influence on corrosion and tribological properties of TiO2 coatings. J. Mater. Res. Technol. (2020).

⁵⁰ Del, A., Moreno, V., López, T. P. & Madrid, M. M. El fenómeno de la corrosión en estructuras de concreto reforzado. Secr. Comun. y Transp. Inst. Mex. del Transp. 75 (2001).


6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. CONCLUSIONES

- Para este estudio en específico se puede concluir con respecto a los ensayos realizados que la adición de TiO_2 , en muestras de mortero con una relación a/c de 0.48 y proporción 1:2.75 entre cemento y agregado genera aumentos en la tasa de corrosión, esto considerando además datos puntuales en la caracterización como el porcentaje de porosidad y el ambiente al que fueron expuestas las muestras de mortero, vale aclarar que al obtener una incongruencia con la literatura queda una incertidumbre de una posible falla en el proceso de mezcla y fundición de las muestras.
- Para la resistencia a la compresión de los cubos de mortero se puede concluir que la cantidad de 2% de TiO_2 asegura una resistencia ideal, ya que se ajusta a la cantidad de cemento para el proceso de hidratación de cemento y así garantizar la resistencia de las probetas. Al aumentar la cantidad de TiO_2 este pasaría a funcionar como un material de relleno.
- Para la resistencia a la compresión se puede establecer que el TiO_2 de acuerdo con su origen metálico este aporta conductividad eléctrica a la matriz de mortero por tal razón disminuye la resistencia a éste ataque químico.
- Para la velocidad de corrosión se establece que de acuerdo con el origen metálico del TiO_2 también influye en este ataque químico, además que los aumentos en la tasa de corrosión, también está sujeta al porcentaje de porosidad y el ambiente a la que fue expuesta la muestra de mortero.

6.2. RECOMENDACIONES

Como recomendación se podría considerar el reestudio de este fenómeno con una mayor variación en la relación de a/c y los porcentajes de TiO_2 utilizados, ya que como se evidencia en las consideraciones experimentales, la tendencia manifiesta una mejora en esta propiedad y posiblemente estos dos parámetros mencionados anteriormente tiene un papel fundamental en la optimización del comportamiento de la mezcla. Además, es recomendable realizar un estudio más profundo respecto a la microestructura del componente químico a estudiar a la hora de hacer la

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	EFFECTO DE LA ADICIÓN DE DIÓXIDO DE TITANIO EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS Y DE DURABILIDAD EN MATERIALES A BASE DE CEMENTO	FECHA: 2020 VERSIÓN 0
--	---	--------------------------


caracterización de la mezcla, este podría por medio de un barrido electrónico de microscopia (SEM) para así obtener un mejor rendimiento y reconocimiento del material utilizado y poder proponer múltiples alternativas de uso dentro del mortero en diferentes presentaciones como por ejemplo nanopartículas, microfibras entre otros.

Es importante considerar la cantidad exacta de TiO_2 a emplear, ya que, aunque se genera una reducción de porosidad, lo cual llega a ser positivo para la resistencia a la penetración de cloruros. Pero una alta dosificación de TiO_2 puede llegar a afectar la hidratación del cemento y así afectar la resistencia a la compresión. Por lo tanto, se debe establecer un balance de una cantidad estándar de TiO_2 que llegue a garantizar aspectos positivos en las propiedades mecánicas y de durabilidad del mortero.

7. BIBLIOGRAFÍA.

1. Kreiger, E. L., Kreiger, M. A. & Case, M. P. Development of the construction processes for reinforced additively constructed concrete. *Addit. Manuf.* **28**, 39–49 (2019).
2. Lee, B. Y., Jayapalan, A. R. & Kurtis, K. E. Effects of nano-TiO₂ on properties of cement-based materials. *Mag. Concr. Res.* **65**, 1293–1302 (2013).
3. Ricardo, M. R. *EL CONCRETO FUNDAMENTOS Y NUEVAS TECNOLOGÍAS*. (2019).
4. Abella, G. Mejora de las propiedades de materiales a base de cemento que contienen TiO₂ : propiedades autolimpiantes. *Univ. Politécnica Madrid* 1–79 (2015).
5. Ander, A., Ugarteburu, E., Ignasi, T. & Hormaechea, C. OPTIMIZACIÓN DE LA APLICACIÓN DE NANOPARTÍCULAS FOTOCATALÍTICAS EN MORTEROS. 74 (2013).
6. MARI SIÑERIZ, M. *APLICACIONES ARQUITECTÓNICAS DE LOS NANOMATERIALES A BASE DE TITANIO: ENVOLVENTES FOTOCATALÍTICAS*. (2015).
7. Prieto, F. B. Efecto del dióxido de titanio (TiO₂) en la resistencia a la compresión del concreto autolimpiante en Colombia. 96 (2015).
8. Khataee, A. R. & Kasiri, M. B. Photocatalytic degradation of organic dyes in the presence of nanostructured titanium dioxide: Influence of the chemical structure of dyes. *J. Mol. Catal. A Chem.* **328**, 8–26 (2010).
9. Lisbona, G. L. E. Materiales Fotocatalíticos Y Sus Aplicaciones En Construcción. 83 (2016).
10. Diamanti, M. V., Lollini, F., Pedferri, M. P. & Bertolini, L. Mutual interactions between carbonation and titanium dioxide photoactivity in concrete. *Build. Environ.* **62**, 174–181 (2013).
11. Gutierrez de Lopez, L. *EL CONCRETO Y OTROS MATERIALES PARA LA CONSTRUCCIÓN*. *Journal of Chemical Information and Modeling* **1**, (2003).
12. QUIROZ CRESPO, M. V. & SALAMANCA OSUNA, L. E. APOYO DIDÁCTICO PARA LA ENSEÑANZA Y APRENDIZAJE EN LA ASIGNATURA DE “TECNOLOGÍA DEL HORMIGÓN”. 429 (2006).

13. Diego, S. G. *Tecnología del concreto y del mortero*. (1993).
14. Diego, S. G. *Durabilidad y Patología del Concreto*. (2002).
15. Khataee, A. & Ali, M. *Nanostructured Titanuim Dioxide Materials*. (2012).
16. Cárdenas Ramírez, C. EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y FOTOCATALÍTICAS DE CEMENTO ADICIONADO CON NANOPARTÍCULAS DE DIÓXIDO DE TITANIO. 118 (2012).
17. Jalal, M., Fathi, M. & Farzad, M. Effects of fly ash and TiO₂ nanoparticles on rheological, mechanical, microstructural and thermal properties of high strength self compacting concrete. *Mech. Mater.* **61**, 11–27 (2013).
18. Hasebe, M. & Edahiro, H. Experimental studies on basic properties of concrete using TiO₂ as admixture. *Proc. 13th East Asia-Pacific Conf. Struct. Eng. Constr. EASEC 2013* (2013).
19. Bogutyn, S., Arboleda, C., Bordelon, A. & Tikalsky, P. Rejuvenation techniques for mortar containing photocatalytic TiO₂ material. *Constr. Build. Mater.* **96**, 96–101 (2015).
20. Rao, S., Silva, P. & De Brito, J. Experimental study of the mechanical properties and durability of self-compacting mortars with nano materials (SiO₂ and TiO₂). *Constr. Build. Mater.* **96**, 508–517 (2015).
21. JULIANA, G. T. EL DIÓXIDO DE TITANIO COMO MATERIAL FOTOCATALÍTICO Y SU INFLUENCIA EN LA RESISTENCIA A LA COMPRESION EN MORTEROS. **63**, 63 (2015).
22. IOPSCIENCE. Effect of nano-titanium dioxide on mechanical and electrical properties and microstructure of reactive powder concrete. 2–24 (2018).
23. Nazari, A. & Riahi, S. TiO₂ nanoparticles effects on physical, thermal and mechanical properties of self compacting concrete with ground granulated blast furnace slag as binder. *Energy Build.* **43**, 995–1002 (2011).
24. Han, B. *et al.* Reactive powder concrete reinforced with nano SiO₂-coated TiO₂. *Constr. Build. Mater.* **148**, 104–112 (2017).
25. Deng, Z. Mechanical properties research on concrete block doped nano-TiO₂ under the conditions of common conservation. *Appl. Mech. Mater.* **238**, 9–12 (2012).
26. Mohseni, E., Ranjbar, M. M. & Tsavdaridis, K. D. Durability properties of high-performance concrete incorporating nano-TiO₂ and fly ash. *Am. J. Eng. Appl. Sci.* **8**, 519–526 (2015).

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	EFFECTO DE LA ADICIÓN DE DIÓXIDO DE TITANIO EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS Y DE DURABILIDAD EN MATERIALES A BASE DE CEMENTO	FECHA: 2020 VERSIÓN 0
--	---	--------------------------

27. Mohseni, E., Naseri, F., Amjadi, R., Khotbehsara, M. M. & Ranjbar, M. M. Microstructure and durability properties of cement mortars containing nano-TiO₂ and rice husk ash. *Constr. Build. Mater.* **114**, 656–664 (2016).
28. Praveenkumar, T. R., Vijayalakshmi, M. M. & Meddah, M. S. Strengths and durability performances of blended cement concrete with TiO₂ nanoparticles and rice husk ash. *Constr. Build. Mater.* **217**, 343–351 (2019).
29. Li, H., Xiao, H., Guan, X., Wang, Z. & Yu, L. Chloride diffusion in concrete containing nano-TiO₂ under coupled effect of scouring. *Compos. Part B Eng.* **56**, 698–704 (2014).
30. Shekari, A. H. & Razzaghi, M. S. Influence of nano particles on durability and mechanical properties of high performance concrete. *Procedia Eng.* **14**, 3036–3041 (2011).
31. DANY JULIETH, S. M. & DIEGO MAURICIO, C. M. EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FOTOCATALÍTICAS DE PREFABRICADOS PARA OBRAS DE INFRAESTRUCTURA VIAL EN CONCRETO ADICIONADO CON DIÓXIDO DE TITANIO (TiO₂). 82 (2019).
32. Técnicas, I.-I. C. de N. NTC 77 Método para el análisis por tamizado de los agregados finos y gruesos. *Icontec* 12 (1994).
33. Técnicas, I.-I. C. de N. Norma Técnica Colombiana NTC 176: Método de ensayo para determinar la densidad y la absorción del agregado grueso. 14 (1995).
34. Técnicas, I.-I. C. de N. Norma Técnica Colombiana 92. Ingeniería Civil y Arquitectura. Determinación de la masa unitaria y los vacíos entre partículas y agregados. (1995).
35. Técnicas, I.-I. C. de N. NTC 221 Método de ensayo para determinar la densidad del cemento hidráulico. 1–8 (2011).
36. Técnicas, I.-I. C. de N. NORMA TÉCNICA NTC COLOMBIANA 110 INGENIERÍA CIVIL Y ARQUITECTURA. CEMENTOS. MÉTODO PARA DETERMINAR LA CONSISTENCIA NORMAL DEL CEMENTO HIDRÁULICO E: CEMENTS. DETERMINATION OF NORMAL CONSISTENCY CORRESPONDENCIA: DESCRIPTORES: cemento; determinación de consi. (1991).
37. Técnicas, I.-I. C. de N. NTC 118 Método para determinar el tiempo de fraguado del cemento hidráulico mediante aparato de Vicat. *Norma Tec. Colomb.* 5 (1998). doi:10.1017/CBO9781107415324.004
38. Técnicas, I.-I. C. de N. NTC 5120: MÉTODO DE ENSAYO PARA

SOLUBILIDAD DE MATERIALES ASFÁLTICOS EN TRICLOROETILENO. (2010).

39. ASTM. New Test Method for Standard test method for pigment loss on ignition. (2014).
40. Salamanca, R. Dosificación de morteros. *Ing. e Investig.* **0**, 17–23 (2010).
41. Técnicas, I.-I. C. de N. Ntc 3329 Especificaciones Del Mortero Para Unidades De Mampostería. 28 (2004).
42. Técnicas, I.-I. C. de N. NTC 220: DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA DE MORTEROS DE CEMENTO HIDRÁULICO USANDO CUBOS DE 50 mm ó 50,8 mm DE LADO. *J. Chem. Inf. Model.* **53**, 287 (2008).
43. NT Build 492. Concrete, mortar and cement-based repair materials: Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments. *Measurement* 1–8 (1999). doi:UDC 691.32/691.53/691.54
44. Laura, A. *et al.* Velocidad de corrosión en el sistema acero-concreto: enfoque al método de curado. *CULCyT* **0**, (2016).
45. ASTM International. ASTM G59 - Standard test method for conducting potentiodynamic polarization resistance measurements. *ASTM Stand.* **97**, 1–4 (2014).
46. Rodríguez, F. Técnicas electroquímicas de corriente directa para la medición de la velocidad de corrosión ‘Resistencia a la polarización’. **303**, 1–9 (2012).
47. Mohseni, E., Miyandehi, B. M., Yang, J. & Yazdi, M. A. Single and combined effects of nano-SiO₂, nano-Al₂O₃ and nano-TiO₂ on the mechanical, rheological and durability properties of self-compacting mortar containing fly ash. *Constr. Build. Mater.* **84**, 331–340 (2015).
48. Daniyal, M., Akhtar, S. & Azam, A. Effect of nano-TiO₂ on the properties of cementitious composites under different exposure environments. *J. Mater. Res. Technol.* **8**, 6158–6172 (2019).
49. Dhiflaoui, H., Khelifi, K., Barhoumi, N. & Ben Cheikh Larbi, A. Effect of voltage on microstructure and its influence on corrosion and tribological properties of TiO₂ coatings. *J. Mater. Res. Technol.* (2020). doi:10.1016/j.jmrt.2020.03.055
50. Del, A., Moreno, V., López, T. P. & Madrid, M. M. El fenómeno de la corrosión en estructuras de concreto reforzado. *Secr. Comun. y Transp. Inst. Mex. del Transp.* 75 (2001).

8. ANEXOS

Ilustración 1. Normas para el trabajo investigativo.

TIPO	ENSAYO	RESÚMEN	NORMA
CEMENTO	MÉTODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR LA DENSIDAD DEL CEMENTO HIDRAÚLICO.	DENSIDAD	NTC 221
	MÉTODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR LA FINURA DEL CEMENTO HIDRAÚLICO POR MEDIO DEL APARATO DE BLAINE DE PERMEABILIDAD AL AIRE.	FINURA	NTC 33
	DETERMINACIÓN DE LA FINURA DEL CEMENTO POR MEDIO DEL TURBIDÍMETRO.		NTC 597
	MÉTODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR LA FINURA DEL CEMENTO HIDRAÚLICO UTILIZANDO EL TAMIZ N° 325.		NTC 294
	MÉTODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR LA FINURA DEL CEMENTO HIDRAÚLICO POR MEDIO DE LOS TAMICES N° 200 y N° 100.		NTC 226
	MÉTODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR EL CALOR DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO HIDRAÚLICO.	HIDRATACIÓN DEL CEMENTO	NTC 117
	MÉTODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR LA CONSISTENCIA NORMAL DEL CEMENTO HIDRAÚLICO.	CONSISTENCIA NORMAL DEL CEMENTO	NTC 110
	MÉTODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR EL TIEMPO DE FRAGUADO DEL CEMENTO HIDRAÚLICO MEDIANTE EL APARATO DE VICAT.	TIEMPOS DE FRAGUADO	NTC 118
	MÉTODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR LOS TIEMPOS DE FRAGUADO DEL CEMENTO HIDRAÚLICO MEDIANTE LAS AGUJAS DE GILLMORE.		NTC 109
	MÉTODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR LA EXPANSIÓN EN AUTOCLAVE DEL CEMENTO PORTLAND.	EXPANSIÓN EN AUTOCLAVE	NTC 107
	MÉTODO PARA DETERMINAR LA FLUIDEZ DE MORTEROS DE CEMENTO PORTLAND.	FLUIDEZ	NTC 111
	DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA DE MORTEROS DE CEMENTO HIDRAÚLICO USANDO CUBOS DE 50mm ó 50.8mm DE LADO.	RESISTENCIAS	NTC 220
	RESISTENCIA A LA TENSIÓN DE MORTEROS DE CEMENTO HIDRAÚLICO		I.N.V. E - 327 - 07
	MÉTODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DE MORTEROS DE CEMENTO HIDRAÚLICO.		NTC 120
AGREGADOS	MÉTODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR LA DENSIDAD Y LA ABSORCIÓN DEL AGREGADO GRUESO.	DENSIDAD Y ABSORCIÓN	NTC 176
	MÉTODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR LA DENSIDAD Y LA ABSORCIÓN DEL AGREGADO FINO.		NTC 237
	MÉTODO QUÍMICO PARA DETERMINAR LA REACTIVIDAD POTENCIAL ALCALÍ - SILICE DE LOS AGREGADOS.	ALCALÍ - AGREGADO	NTC 175
	MÉTODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR LOS TERRONES DE ARCILLA Y PARTÍCULAS DELEZNABLES EN EL AGREGADO.	TERRONES DE ARCILLA Y PARTÍCULAS DELEZNABLES	NTC 589
	MÉTODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR LA SOLIDEZ (SANIDAD) DE AGREGADOS PARA EL USO DE SULFATO DE MAGNESIO.	RESISTENCIA A SULFATACIÓN	NTC 126
	MÉTODO DE ENSAYO PARA EL ANÁLISIS POR TAMIZADO DE LOS AGREGADOS FINOS Y GRUESOS.	TAMIZADO/GRANULOMETRÍA	NTC 77
AGUA	AGUA PARA LA ELABORACIÓN DE CONCRETO	AGUA	NTC 3459

Fuente: Propia.

Ilustración 2. Diseño de Mezcla con TiO₂.

DISEÑO DE MEZCLA CON TiO ₂					
0% DE TiO ₂			1% DE TiO ₂		
Material	Peso [Kg]		Material	Peso [Kg]	
Cemento	4,16		Cemento	4,16	
Agua	2,02		Agua	2,02	
Arena	11,43		Arena	11,43	
TiO ₂	0		TiO ₂	0,042	
2% DE TiO ₂		3% DE TiO ₂			
Material	Peso [Kg]	Material	Peso [Kg]		
Cemento	4,16	Cemento	4,16		
Agua	2,02	Agua	2,02		
Arena	11,43	Arena	11,43		
TiO ₂	0,083	TiO ₂	0,125		

Fuente: Propia.

Ilustración 3. Tipos de Mortero.

TIPOLOGIA	DENOMINACIÓN			
COMPOSICIÓN	MORTEROS CALCAREOS Y DE YESO			
	MORTEROS DE CAL Y CEMENTO	MORTEROS DE MAMPOSTERIA	TIPO M	
			TIPO S	
			TIPO N	
			TIPO O	
		MORTEROS DE RELLENO	TIPO PM	
			TIPO PL	
SISTEMA DE PRODUCCIÓN	MEZCLADO EN OBRA	DOSIFICADO POR SILOS		
		DOSIFICADO EN CAMIONES DE BACHADA VOLUMÉTRICA		
	MORTEROS PREMEZCLADOS O PREDOSIFICADOS			

Fuente: Propia

Ilustración 4. Granulometría del agregado.

GRANULOMETRIA								
TAMIZ	DIÁMETRO	PESO RETENIDO	PORCENTAJE RETENIDO	PORCENTAJE RETENIDO ACUMULADO	PORCENTAJ E QUE PASA	LIM. INFERIOR	LIM. SUPERIOR	DENOMINACIÓ N
	mm	gr	%					
3/8	9,52	0	0	0	100	100	100	GRAVILLA
4	4,76	3,23	1,088	1,088	98,912	95	100	ARENA
8	2,36	148,322	49,953	51,041	48,959	80	100	
16	1,18	95,7	32,231	83,272	16,728	50	85	
30	0,6	34,64	11,666	94,938	5,062	25	60	
50	0,3	10,12	3,408	98,346	1,654	5	30	
100	0,15	3,3	1,111	99,458	0,542	0	10	
Fondo		1,61	0,542	100	0			
VALOR REAL		296,922	100					
MODULO DE FINURA		4,281427446						

Fuente: Propia

Ilustración 5. Desviación Estándar Granulometría.

DESVIACIÓN ESTÁNDAR				
μ	$(x - \mu)^2$	$\Sigma (x - \mu)^2$	$\Sigma (x - \mu)^2 / N$	$(\Sigma (x - \mu)^2 / N)^{(1/2)}$
33,982	4358,356	13250,792	1892,970	43,508
	4215,907			
	224,305			
	297,696			
	836,379			
	1045,133			
	1118,229			
	1154,787			

Fuente: Propia

Ilustración 6. Masas Unitarias del Agregado.

MASAS UNITARIAS		
PROPIEDAD	UNIDADES	VALOR
MUS	Kg/m ³	1389,07
MUC	Kg/m ³	1580,46
V	m ³	0,00302
PESO (MUS)	Kg	4,1949914
PESO (MUC)	Kg	4,7729892

Fuente: Propia

Ilustración 7. Contenido de Humedad del Agregado.

CONTENIDO DE HUMEDAD		
A	g	500
B	g	521,2
C	g	311,2
D	g	508,4
Abs	%	4,24
W	%	1,68

Fuente: Propia

Ilustración 8. Densidad del Agregado.

DENSIDAD	Kg/m ³	168,344371
DENSIDAD NOMINAL	2,641684322	
DENSIDAD APARENTE	2,375	
DENSIDAD APARENTE, SATURADA Y SECA SUPERFICIALMENTE	2,4757	
Daparente < Dsss < Dnominal	CUMPLE	

Fuente: Propia.

Ilustración 9. Densidad del Cemento.

DENSIDAD DEL CEMENTO					
PROPIEDAD	UNIDADES	PRUEBA			
		1	2	3	
Peso del cemento	g	64	64	64	
	kg	0,064	0,064	0,064	
Volumen inicial líquido, Vi	cm3	0	0	0	
	m3	0	0	0	
Volumen final líquido, Vf	cm3	21,2	21,5	21	
	m3	0,0000212	0,0000215	0,000021	
Temperatura	°C	21	21		
PROPIEDAD	UNIDADES	PRUEBA			PROMEDIO
		1	2	3	
DENSIDAD	g/cm3	3,019	2,977	3,048	3,014
DENSIDAD RELATIVA	ADIM	3,019	2,977	3,048	3,014
Densidad del agua a 4°C					
	g/cm3			1	

Fuente: Propia.

Ilustración 10. Tiempos de Fraguado.

TIEMPOS DE FRAGUADO			
Tiempo	Penetración	Tiempo	Penetración
min	mm	min	mm
0	40	155	21,5
30	40	165	19,5
60	40	175	16
90	40	185	16
105	40	195	1
115	39	205	7
125	32	215	4,5
135	30	225	1,5
145	29,5	235	0

Fuente: Propia.

Ilustración 11. Consistencia Normal.

CONSISTENCIA NORMAL				
PROPIEDAD	UNIDADES	Prueba		
		1	2	3
Vol Agua	ml	170	180	190
Peso Agua	g	170	180	190
Peso cemento	g	650	650	650
Li	mm	0	0	0
Lf	mm	4	9	14

Fuente: Propia.

Ilustración 12. Densidad TiO_2 .

Dióxido de Titanio		
Propiedad	Unidades	Valor
Densidad	g/cm ³	4,18
Perdida por secado	%	0,28
Perdida por ignición	%	0,48

Fuente: Propia.



UNIVERSIDAD CATÓLICA
de Colombia

FACULTAD DE INGENIERÍA
COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO

EFFECTO DE LA ADICIÓN DE DIÓXIDO DE TITANIO EN
LAS PROPIEDADES MECÁNICAS Y DE DURABILIDAD
EN MATERIALES A BASE DE CEMENTO

FECHA: 2020
VERSIÓN 0